



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN**

**COMUNICACIONES.  
CALCULO DE UN ENLACE SATELITAL**

**TRABAJO DE SEMINARIO**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**  
**P R E S E N T A :**  
**GUILLERMO GONZALEZ PEREZ**

ASESOR: ING. JORGE RAMIREZ RODRIGUEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, ESTADO DE MEXICO

2002

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PAGINACIÓN

DISCONTINUA

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLAN



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautitlán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario

Comunicaciones. Cálculo de un enlace satelital

que presenta el pasante: Guillermo González Pérez  
con número de cuenta: 8123893-6 para obtener el título de  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 13 de Diciembre de 2001

MODULO	PROFESOR	FIRMA
<u>I</u>	<u>Ing. Jorge Ramírez Rodríguez</u>	<u>Jamiz</u>
<u>II</u>	<u>Ing. Vicente Magaña González</u>	<u>Vicente Magaña</u>
<u>IV</u>	<u>Ing. Rodolfo López González</u>	<u>Federico</u>

## **A MIS PADRES**

Por el gran apoyo, la paciencia y la comprensión  
que me han brindado toda mi vida.

**GRACIAS.**

## **A MIS HERMANAS**

Maru, Graciela y Lucy por su invaluable ayuda.

**GRACIAS.**

## **A LA AMISTAD**

Brindada por las personas que conoci durante la  
carrera: Elena Ch., Maggie C., Virginia P.,  
Fernando P., José Luis V., Alfredo R. y Moises H. .

**GRACIAS.**

# CALCULO DE UN ENLACE SATELITAL

## INDICE

	Pag.
<b>INTRODUCCION</b>	1
<b>CAPITULO 1. SATELITES DE COMUNICACIONES</b>	1
1.1 HISTORIA DE LOS SATELITES	2
1.2 DEFINICION DE SATELITE DE COMUNICACIONES	5
1.3 FUNCIONAMIENTO BASICO	6
1.4 TIPOS DE ORBITAS	9
1.5 UBICACION EN ORBITA	17
1.6 SEGMENTO ESPACIAL Y TERRESTRE	24
1.7 SUBSISTEMAS DE UN SATELITE	30
1.8 HACES Y COBERTURAS	32
1.9 BANDAS DE FRECUENCIAS	48
1.10 PRINCIPALES APLICACIONES	50
1.11 VENTAJAS, DESVENTAJAS Y COMPARACIONES	56
<b>CAPITULO 2. CALCULO DE UN ENLACE SATELITAL</b>	58
2.1 ¿QUE ES EL CALCULO DE ENLACE?	59
2.2 GEOMETRIA DEL ENLACE	61
2.3 TIPOS DE ATENUACIONES	65
2.4 CONSIDERACIONES DE TRANSMISION Y RECEPCION	70
2.5 PARAMETROS DEL SISTEMA	74
2.6 ECUACIONES DEL ENLACE	86
2.7 EVALUACION DE ENLACE	90
2.8 PARAMETROS NO IDEALES	91
2.9 RESUMEN DEL CALCULO DE ENLACE	92
2.10 EJEMPLOS	93
CONCLUSIONES	102
BIBLIOGRAFIA	105

## **INTRODUCCION**

El desarrollo de las comunicaciones vía satélite al igual que las microondas, se vio favorecido durante la Segunda Guerra Mundial.

La llegada de los satélites ha modificado notablemente la forma de vida de la mayor parte de la población del mundo, y tal vez de toda la población aunque sea de forma indirecta.

Gracias a los satélites se puede conocer con mayor precisión los recursos naturales de la tierra y los fenómenos meteorológicos, las distancias entre ciudades y los países se han acortado y ahora pueden intercambiar todo tipo de información casi instantáneamente, y más allá de las capas atmosféricas podemos observar y comprender mejor el universo.

Para llevar a cabo la comunicación a distancia se requiere de un medio de enlace, el cual actualmente esta clasificado en dos grandes grupos.

**Fisico:** Conductores eléctricos en sus diferentes configuraciones, cables multipolares, cables coaxiales y los cables de fibra óptica.

**Radioeléctrico:** Entre estos tenemos los enlaces de radio, los radiorepetidores en las diferentes bandas de frecuencia, entre los que destacan los de microondas y la comunicación Vía satélite.

Por lo anterior podemos decir que la comunicación vía satélite es un medio de comunicación radioeléctrico que utiliza las ondas de radio como portadoras de información y que es un medio de gran capacidad pues por el se pueden realizar cientos de conversaciones telefónicas simultáneas o la transmisión de varias señales de televisión, además de otros tipos de información.

En general, todos los satélites artificiales funcionan bajo el mismo principio y constan de varias partes comunes, independientemente de su objetivo en órbita alrededor de la tierra. Es obvio que hay algunas diferencias fundamentales entre ellos, pero de cualquier forma, constan por ejemplo, de una buena cantidad de celdas solares para alimentarse de energía, de antenas para transmitir su información a ciertos puntos de la tierra y también para poder recibir instrucciones o cualquier otro tipo de señales desde dichos puntos de la tierra, así como también constan de medios de propulsión para corregir su órbita, posición u orientación con respecto a la tierra.

Los satélites forman una gran familia, y parte de ella la constituyen los que están dedicados específicamente a los servicios de comunicaciones, dentro de estos últimos existen algunas variantes, pero los geoestacionarios son los más importantes y los que más se usan en la actualidad.

Con ellos es posible comunicar lugares muy lejanos o inaccesibles con una gran variedad de información como señales de televisión, teléfono, datos, etc., etc. .



# **CAPITULO 1**

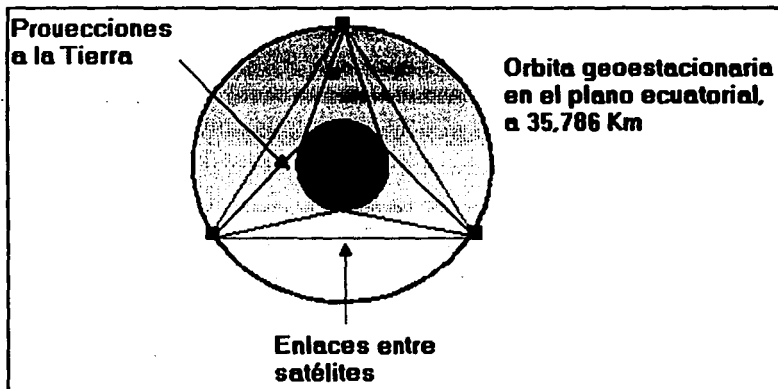
# **SATELITES DE COMUNICACIONES**

## 1.1 HISTORIA DE LOS SATELITES

La historia de los satélites la podemos resumir en los siguientes puntos.

La Segunda Guerra Mundial sirvió como detonador para el desarrollo de las microondas y las comunicaciones satelitales.

Arthur C. Clarke, que fuera escritor de ciencia-ficción, mencionó por primera vez en el año de 1945 el concepto de una red de 3 satélites geostacionarios, para lograr una comunicación global. Las longitudes de los satélites serían:  $30^{\circ}$  E,  $150^{\circ}$  E y  $90^{\circ}$  W. Véase la siguiente figura.



El tipo más simple de un satélite es un reflector pasivo, un dispositivo que simplemente "rebota" una señal de un lugar a otro. La Luna es un satélite natural de la tierra y, por consiguiente, a finales de los años 40s y principios de los años 50s, se volvió el primer satélite "transponedor" (repetidor).

En 1954, La Armada Americana transmitió con éxito los primeros mensajes de tierra-a-luna-a-tierra.

En 1956, un servicio de transmisión se estableció entre Washington D.C. y Hawai y, hasta 1962, ofreció fiables comunicaciones de largas distancias. El servicio sólo estaba limitado por la disponibilidad de la Luna.

En 1957, Rusia lanzó el Sputnik I, el primer satélite de tierra activo. Un satélite activo es capaz de recibir, amplificar, y retransmitir información de y para las estaciones terrenas. El Sputnik I transmitió información de telemetría durante 21 días. Después en el mismo año, los Estados Unidos lanzaron al Explorer I, que transmitió información de telemetría durante casi 5 meses.

En 1958, la NASA lanzó el SCORE, un proyector de forma cónica de 150-libras. Con una grabadora de cinta a bordo, el SCORE retransmitió el mensaje navideño del presidente Eisenhower. El SCORE fue el primer satélite artificial usado para relevar comunicaciones terrestres. El SCORE era un satélite repetidor con retraso; recibía transmisiones de las estaciones de tierra, los almacenaba en cinta magnética, y los retransmitía a las estaciones en tierra más alejadas a lo largo de su órbita.

En 1960, la NASA junto con los Laboratorios Telefónicos Bell y el Laboratorio de Motores de Propulsión a Reacción lanzaron el ECHO, un globo de plástico de 100-ft de diámetro con una capa de aluminio. ECHO reflejó señales de radio pasivamente de una antena de tierra grande. ECHO era simple y confiable pero requería transmisores de poder extremadamente altos en él y en las estaciones de tierra. La primera transmisión transatlántica usando un satélite repetidor

(transponedor) fue completada usando el ECHO. También en 1960, La **Secretaría De Defensa** lanzó al **COURIER**. El **COURIER** transmitió 3 w de potencia y duró 17 días.

En 1962, **AT&T** lanzó al **TELSTAR I** el primer satélite para recibir y transmitir simultáneamente. El equipo electrónico en el **TELSTAR I** fue dañado por la radiación de los recién descubiertos **Anillos de Van Allen** y, por consiguiente, duró sólo pocas semanas. El **TELSTAR II** era electrónicamente idéntico al **TELSTAR I**, pero se hizo más resistente a la radiación. El **TELSATR II** se lanzó con éxito en 1963. Se usó para el teléfono, televisión, facsimil y transmisiones de datos. La primera Transmisión exitosa de vídeo fue completada con el **TELSTAR II**. La **NASA** realiza varios proyectos como el **Relay** en 1962.

Primer satélite geostacionario de la **NASA** llamado **Syncom II** en julio de 1963.

Primer satélite de comunicaciones ruso llamado **Molnya** en 1965.

**COMSAT** fue la primera compañía privada en lanzar un satélite, el cual es llamado **Early Bird** en el año 1965. Este sirvió durante 6 años.

En 1965 surge **INTELSAT** (**International Telecommunications Satellite Organization**) como la primera organización internacional con el objetivo de establecer y operar una red de satélites para comunicaciones en todo el mundo.

Surgen nuevas organizaciones como **INMARSAT**, **EUTELSAT**, **ARABSAT**, **ASIASAT**, **PANAMSAT**, etc..

La **NASA** crea el proyecto **ACTS** para aumentar la capacidad, potencia y funcionalidad de los satélites.

## 1.2 DEFINICION DE SATELITES DE COMUNICACIÓN.

La Astronomía define al satélite como un cuerpo opaco, que acompaña a otro en su marcha por el espacio, es decir, que un satélite es un cuerpo secundario que órbita alrededor de otro cuerpo mayor llamado principal. Como ejemplo tenemos a la luna que es el satélite natural de la tierra. Los satélites se dividen en dos clases:

- a) Naturales
- b) Artificiales ( Creados por el hombre)

Por lo anterior y tratando de utilizar una definición sencilla para SATELITE DE COMUNICACIÓN podemos decir que es una estación repetidora que tiene un circuito de transmisión ascendente, desde la estación terrestre hacia el satélite y un circuito de transmisión descendente desde el satélite hacia la lejana estación terrestre.

En general, todos los satélites artificiales funcionan bajo el mismo principio y constan de varias partes comunes, independientemente de su objetivo en órbita alrededor de la tierra. Es obvio que hay algunas diferencias fundamentales entre ellos, pero de cualquier forma, constan por ejemplo, de una buena cantidad de celdas solares para alimentarse de energía, de antenas para transmitir su información a ciertos puntos de la tierra y también para poder recibir instrucciones o cualquier otro tipo de señales desde dichos puntos de la tierra, así como también constan de medios de propulsión para corregir su órbita, posición u orientación con respecto a la tierra.

Por su finalidad de usos los satélites artificiales pueden ser:

- a) Astronómicos.
- b) De comunicaciones.
- c) De prospección a distancia.
- d) Meteorológicos.
- e) Militares.
- f) Para laboratorios espaciales, etc..

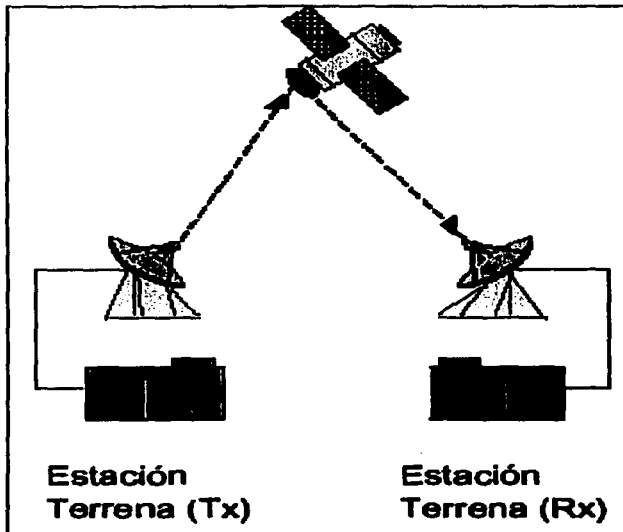
### 1.3 FUNCIONAMIENTO BASICO.

Los satélites de comunicaciones de acuerdo a su tipo de operación pueden ser:

- **Satélites tontos.-** Son totalmente transparentes, es decir su señal puede ser captada fácilmente. Su funcionamiento es similar a un espejo o simple repetidor en el espacio.

En forma simplificada podemos decir que trabaja de la siguiente manera:

- a) Recibe señales por su antena receptora.
- b) Amplifica las señales.
- c) Cambia la frecuencia de subida ( $F_{up}$ ) por la frecuencia de bajada ( $F_{down}$ ).
- d) Finalmente amplifica y retransmite las señales de microondas hacia la tierra ( vea la siguiente figura ).



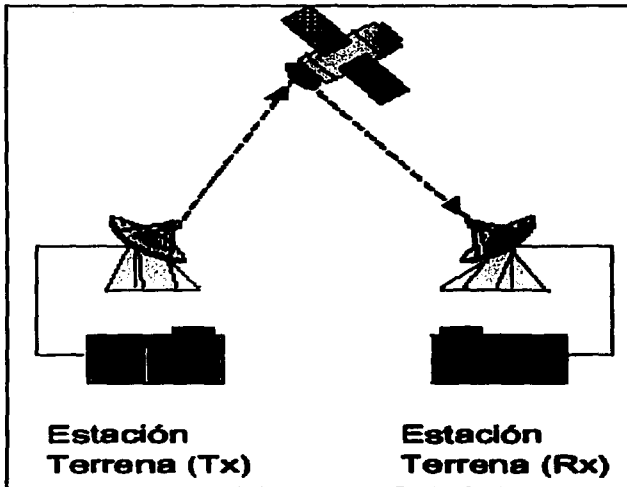
- **Satélites inteligentes.**- Ofrece la posibilidad de procesar las señales en el espacio antes de retransmitir a la tierra.

Características:

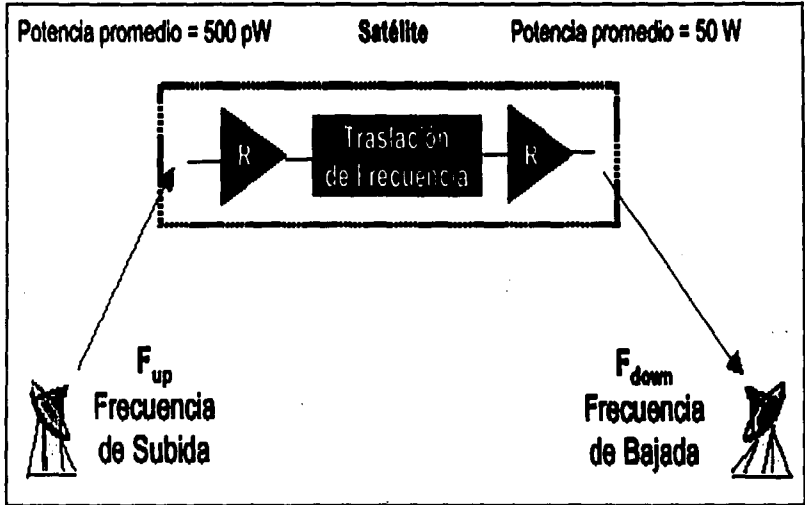
- ✓ Son usados para los servicios que fueron diseñados.
- ✓ Los satélites inteligentes no aceptan señales nuevas no previstas.
- ✓ Es un satélite digital.

En forma general el funcionamiento de un satélite inteligente es el siguiente:

- Recibe las señales de microondas por su antena de recepción.
- Amplifica estas señales.
- Demodula las señales.
- Conmuta en banda base, de ser necesario.
- Cambia la frecuencia de subida ( $F_{up}$ ) a frecuencia de bajada ( $F_{down}$ ) como se muestra en la siguiente figura.



Por lo anterior podemos resumir el funcionamiento básico de un satélite de comunicación como lo muestra la siguiente figura.



Las frecuencias de subida y bajada son diferentes a fin de no interferir una señal con la otra.

Los R son amplificadores, para reconstruir la señal de  $R_x$ , y para proporcionar la ganancia necesaria a la señal de  $T_x$ .



## 1.4 TIPOS DE ORBITAS

Una vez proyectado, un satélite permanece en órbita porque la fuerza centrífuga causada por su rotación alrededor de la tierra es contrapesada por el tirón gravitacional de la tierra. El satélite gira y cuando esta más cerca a la tierra, el tirón gravitacional es más grande y se exige una mayor velocidad para mantenerlo sin que caiga a tierra.

A continuación veremos los diferentes tipos de órbitas.

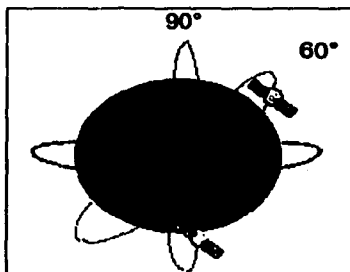
### Satélites de Órbita Baja

Los Satélites de Órbita Baja, orbitan cerca de la tierra (300 y 800 Km de altura sobre el nivel del mar) viajan a aproximadamente 17,500 millas por hora. A esta velocidad, toma aproximadamente 1.5 h girar alrededor de la tierra entera. Por consiguiente, el tiempo que el satélite está en línea de vista de una estación particular de la tierra es de 1/4 hora ó menos por órbita. Tienen una geometría casi circular con un ángulo de inclinación entre 60 y 90 grados.

Podemos decir que sus aplicaciones son para las observaciones astronómicas y científicas, y en la actualidad se emplean para las comunicaciones móviles, usando satélites de alta potencia reduciendo así el tamaño de las antenas; así como los proyectos Iridium, Aries, Globalstar, Leosat, Starnet y Teledisc.

En la siguiente imagen podemos ver este tipo de órbita.

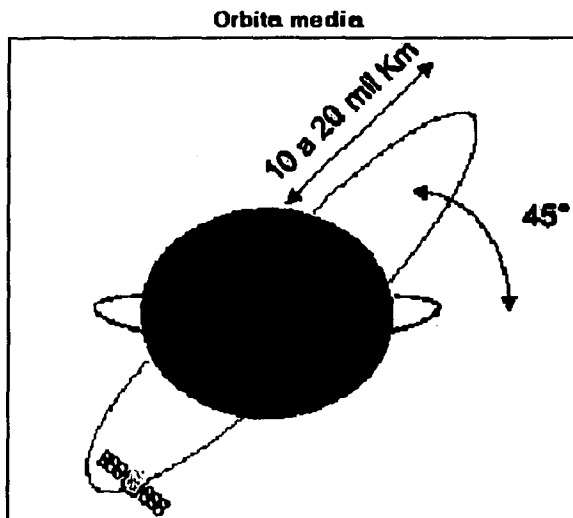
**Órbitas bajas**



### Satélites de Órbita Media o Intermedia

Los Satélites de Órbita Media o Intermedia llamados también de Altitud-Media (10,000 a 20,000 Km de altura sobre el nivel del mar) son circulares, inclinadas respecto del Ecuador; tienen un periodo de rotación de 5 a 12 horas y permanece visible para una estación particular de la tierra por 2 a 4 horas por órbita. Las aplicaciones para este tipo de órbitas son los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y las comunicaciones móviles.

La siguiente imagen muestra la órbita media.

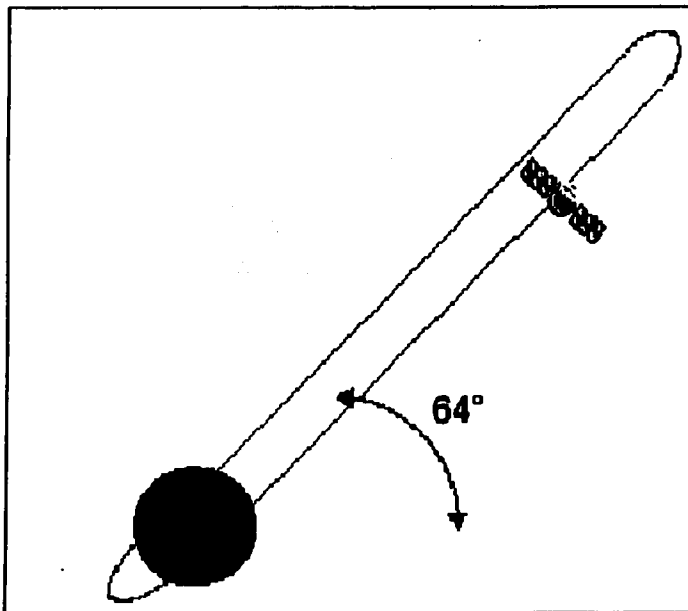


### Satélites de Órbita Elíptica

Los satélites de órbita Elíptica tienen un ángulo de inclinación de **64 grados** respecto al Ecuador, con una rotación de 12 horas y una altura de **600 Km** (en el apogeo) y **40,000 Km** (en el perigeo). Sus aplicaciones son de observaciones científicas y comunicaciones (satélites Molnya), así como el proyecto Ellipsat de comunicaciones móviles.

La siguiente imagen muestra este tipo de órbita.

### Órbita Elíptica

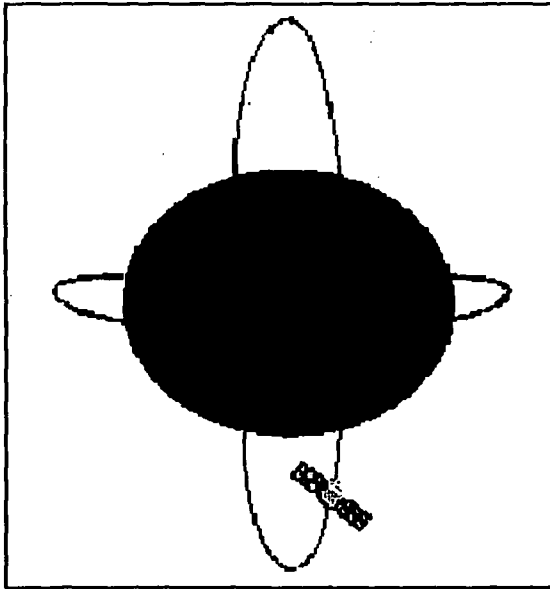


### Satélites de Órbitas Polares

Los satélites de órbitas polares tienen una geometría circular con un ángulo de inclinación de 90 grados respecto al Ecuador, un tiempo de rotación de 100 minutos y una altura de 800 Km de altura sobre el nivel del mar. Sus aplicaciones son para la observación meteorológica.

La siguiente imagen ilustra a este tipo de órbita.

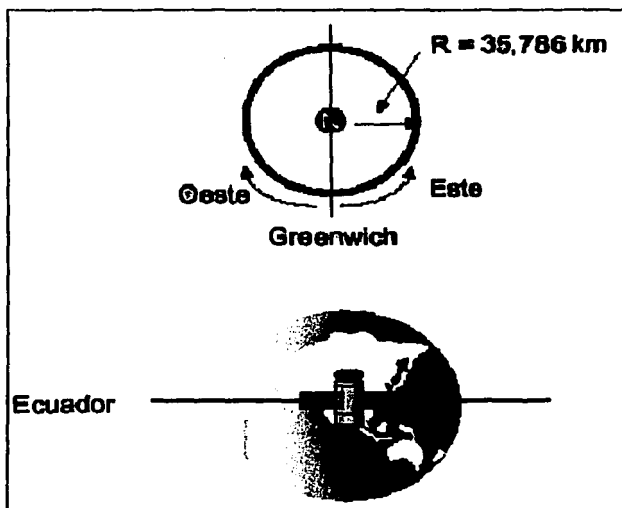
### Órbitas polares



### Satélites de Alta-Altitud, Geosincronicos o Geoestacionarios

Los Satélites de Alta-Altitud, Geosincronicos o Geoestacionarios son satélites que tienen un patrón de órbita circular con una velocidad angular igual a la de la tierra. Por consiguiente, ellos permanecen en una posición fija con respecto a un punto dado en la tierra. Una ventaja obvia es que ellos están disponibles con su sombra para todas las estaciones de tierra el 100% de su tiempo. La sombra de un satélite incluye todas las estaciones de tierra que tienen un camino de línea-de-vista a él y quedan dentro del patrón de la radiación de las antenas del satélite. Una desventaja obvia es que ellos requieren de dispositivos de propulsión sofisticados y pesados a bordo para mantenerlos en una órbita fija. El tiempo de una órbita de un satélite geosincronico es de 24 horas, igual que el de la tierra. Tienen una altura de 35,786 Km sobre el nivel del mar y sus aplicaciones son la meteorología y las comunicaciones. Ver la siguiente imagen.

#### Orbita Geoestacionaria



### **Ventajas De Orbitas Geosincronicas**

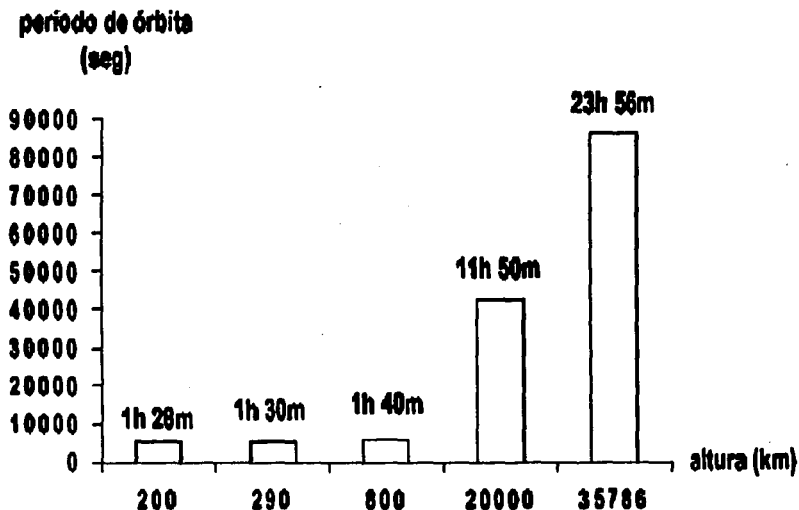
- El satélite permanece casi estacionario respecto a una estación dada en la tierra. Por consiguiente, el equipo de rastreo caro no es requerido en las estaciones de tierra.
- No hay ninguna necesidad de cambiar de un satélite a otro cuando ellos orbitan sobre las estaciones. Por consiguiente, no hay cortes en la transmisión debido a los tiempos de cambio.
- Los satélites de alta-altitud o geosincronicos pueden cubrir una área mucho más grande de la tierra que sus colegas de órbita de baja-altitud.
- Los efectos de cambio de dopler son despreciables.

### **Desventajas De Las Orbitas Geosincronicas**

- Las altitudes más altas de los satélites geosincronicos introducen mayores tiempos de propagación. El retraso de las propagaciones del viaje-redondo entre dos estaciones de tierra a través de un satélite geosincronico es de 500 a 600 ms.
- Los satélites geosincronicos requieren transmisores de potencia más alta y receptores más sensibles debido a una distancia mayor y en consecuencia las pérdidas de trayectoria también son mayores.
- Alta-Precisión en las naves son requeridas para colocar un satélite geosincronico en la órbita y mantenerlo ahí. También, se requieren artefactos de propulsión a bordo de los satélites para mantenerlos en sus respectivas órbitas.

En la siguiente gráfica podemos observar el tiempo que tarda un satélite en completar un giro dependiendo de su altura con respecto a la superficie de la Tierra.

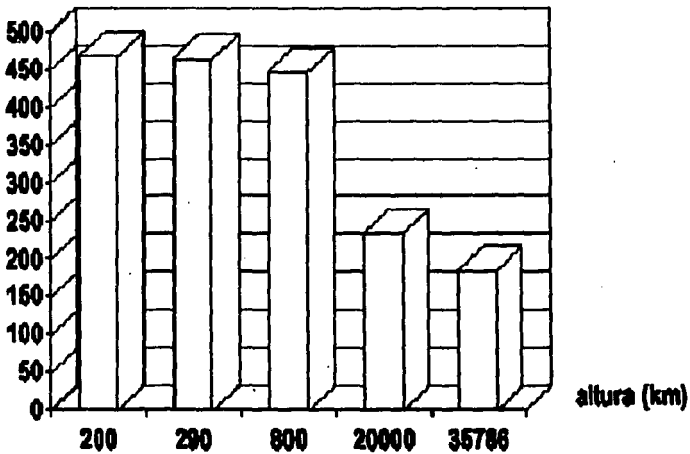
### Período de un satélite de órbita circular



En la siguiente gráfica podemos ver la velocidad de un satélite de órbita circular, dependiendo de la altura que este tenga con respecto a la superficie de la Tierra.

### Velocidad de un satélite de órbita circular

velocidad (km/h)





## 1.5 UBICACIÓN EN ORBITA GEOESTACIONARIA

Para colocar un satélite en órbita geostacionaria es necesario recordar un poco de la historia de los satélites, es decir recordar a Arthur C. Clarke quien sugirió la posibilidad de colocar satélites artificiales en una órbita tal que al observarlos desde un punto sobre la superficie de la Tierra parecería que no se moviesen, como si estuviesen colgados en el cielo. Los satélites no cambiarían aparentemente de posición y esto traería consigo grandes ventajas pues, tal como se verificaría años más tarde, su operación se simplificaría y el costo de los equipos terrestres necesarios para utilizarlos se reduciría, en relación con el uso de otras órbitas.

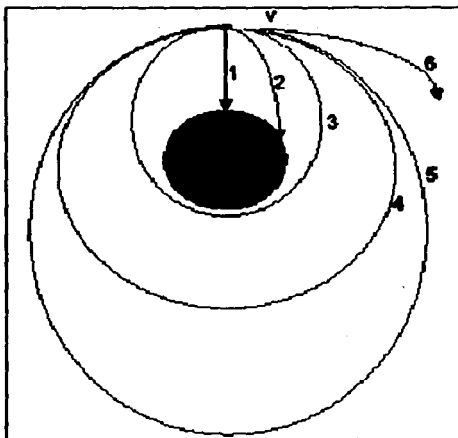
¿Cómo sería posible lograrlo, si los satélites deben moverse a gran velocidad, para no perder altura y caer hacia la Tierra, atraídos por ella?. La Tierra gira sobre su propio eje, completando una vuelta cada 24 horas; si se coloca a un satélite de tal forma que gire circularmente alrededor de ella en un plano imaginario que la atraviese por el círculo ecuatorial, y si el satélite también completa una vuelta en 24 horas, entonces para un observador sobre un punto fijo de la Tierra se produce la ilusión de que el satélite no se mueve.

La idea de Clarke era muy buena y debían cumplirse varios requisitos para que el satélite fuese en verdad fijo con respecto a la Tierra, es decir, **Geostacionario**. En primer lugar, el satélite debía desplazarse en el mismo sentido de rotación que la Tierra; además, para que no perdiese altura poco a poco y completase una vuelta cada 24 horas, debía estar aproximadamente a 36,000 Km de altura sobre el nivel del mar; para lograrlo el satélite debía tener una velocidad constante de 3,075 m/s, siguiendo una órbita circular alrededor de la tierra.

La órbita en cuestión recibe el nombre de **Orbita Geostacionaria**, pero con frecuencia muchos autores e investigadores también se refieren a ella como el **Cinturón de Clarke**, en justo reconocimiento a su promotor.

La siguiente imagen nos sirve para explicar el por que un satélite geoestacionario debe estar a una altura de 35,786 Km sobre el nivel del mar.

### Ubicación en órbita Geoestacionaria



Dependiendo de la magnitud de la velocidad inicial  $v$  con la que es lanzado el satélite, la trayectoria de este tomará las formas indicadas como 1, 2, .... 6. En 1,  $v = 0$ . Para 6, la velocidad tiende al infinito.

Existe un caso (4), en que el satélite tomará una órbita completamente circular. En tal caso, la fuerza de gravitación igualara a la fuerza debido a la rotación:

$$GMm / r^2 = mv^2 / r$$

Donde  $M$  = masa de la Tierra =  $5.974 \times 10^{24}$  Kg

$m$  = masa del satélite

$$G = 6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{Kg s}^2$$

$r$  = altura del satélite

$v$  = velocidad del satélite

$$\text{Si } r = f(v) \quad \text{dada } v = 2\pi / 86,160 \text{ seg}$$

$r = 42,162$  Km por lo tanto la altura sobre el nivel del mar = 35,786 Km.

Existen tres procedimientos para colocar al satélite en su Órbita Geoestacionaria, a los cuales llamaremos **Inyección**.

#### **Inyección Directa en Órbita Geoestacionaria**

En este caso, el satélite es transportado por un cohete de varias etapas hasta el **Cinturón de Clarke**, sin que necesite realizar esfuerzos propios, lo que en cambio si es necesario en los otros dos procedimientos que se explican más adelante. La **Inyección Directa** en la **Órbita Geoestacionaria** es muy costosa y solo se utiliza para lanzar satélites militares; como el satélite no realiza esfuerzos propios, es decir no lleva motores acoplados directamente a él, para pasar de una órbita a otra, la probabilidad de que llegue a su destino en buenas condiciones aumenta.

#### **Inyección Inicial En Órbita Elíptica**

En este procedimiento las etapas del sistema lanzador colocan al satélite en una órbita de **gran excentricidad**, es decir, muy alargada, en la que el centro de la Tierra es uno de los dos focos. Una vez ahí el satélite se separa del cohete y da una o varias vueltas en esa órbita, llamada de **Transferencia Geosíncrona**, hasta que se lleva a cabo la siguiente etapa del proceso, ya con esfuerzos propios de él mismo.

El perigeo de la órbita de transferencia geosíncrona esta normalmente a una altura aproximada de 200 Km sobre el nivel del mar y su apogeo cerca de los 35,788 Km, que es la altura final en la que el satélite debe quedar para funcionar. El paso siguiente es circularizar la órbita y para ello el satélite lleva acoplado un motor que se enciende precisamente en el punto de apogeo de la última vuelta elíptica que se haya programado; obviamente, el encendido se efectúa después de haber orientado al satélite a control remoto en forma adecuada, para que el empuje del **Motor De Apogeo** resulte en la dirección correcta. Al encenderse este, el satélite recibe un incremento

sustancial de velocidad y su órbita cambia, pasando de la **elíptica de transferencia geosíncrona** a la **circular geoestacionaria**.

### **Inyección Inicial En Órbita Circular Baja**

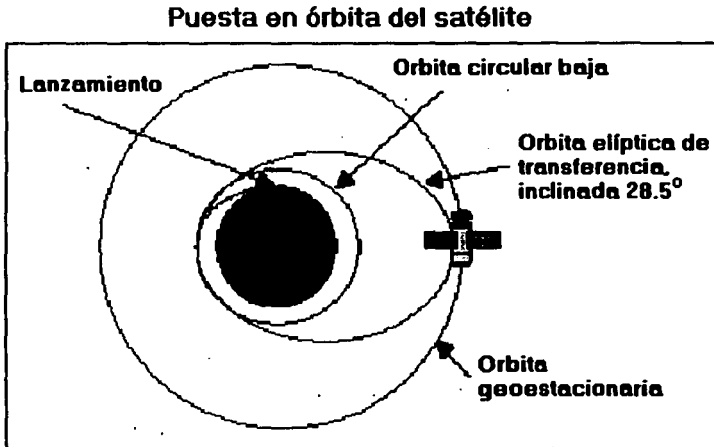
Esta es la técnica empleada por el Sistema de Transportación Espacial de la NASA de los Estados Unidos, mejor conocido como **Orbitador**, y consiste en tres pasos, los dos últimos son idénticos al caso anterior de inyección inicial en órbita elíptica, y el primer paso se describe a continuación.

El orbitador despegando llevando al satélite en su compartimiento de carga y entra en órbita alrededor de la Tierra siguiendo una trayectoria circular, a una altura aproximada de 300 Km sobre el nivel del mar. En una de las muchas vueltas que da la nave, el satélite es liberado o arrojado del compartimiento de carga, quedando de esta forma también en órbita circular baja alrededor de la Tierra, aunque separado del vehículo espacial; la velocidad inicial del satélite es la misma que la de la nave, aunque ligeramente modificada por el efecto de los resortes que se emplean para arrojarlo del compartimiento de carga. La separación se efectúa cuando la nave va cruzando el plano del ecuador, y 45 minutos más tarde, cuando el satélite vuelve a cruzar el plano del ecuador, su motor de perigeo se enciende. Este le da un empuje tal que modifica su órbita, cambiándola de circular baja o de estacionamiento a una elíptica, similar a la del segundo caso explicado anteriormente. Una vez que ha cumplido su función, el motor de perigeo se desprende del resto del cuerpo del satélite, dando así las condiciones adecuadas para que, más adelante y en el momento preciso, un motor de apogeo acoplado al cuerpo del satélite se encienda para circularizar la órbita con su altura final.

En realidad, el procedimiento para colocar un satélite en **órbita geoestacionaria** no es tan simple como parece ser de acuerdo con los tres métodos descritos. No solamente hay que proporcionarle cambios o incrementos de velocidad al satélite para modificar la geometría de las órbitas que formen parte del procedimiento elegido, sino que al mismo tiempo también hay que lograr pasar de

un plano a otro, y todo ello haciendo el menor consumo de energía (combustible) para reducir los costos del lanzamiento.

En la siguiente imagen podemos ver en forma resumida los procedimientos para la puesta en órbita de un satélite geostacionario.



Donde el lanzador libera al satélite para que siga una órbita geosíncrona, después dará varias vueltas para ajustar posición y velocidad, para finalmente en el perigeo encender el motor correspondiente e integrarse a la órbita geostacionaria.

### Ubicación Del Satelite En Su Orbita

Una vez que el satélite ha llegado a su posición final en el cinturón de Clarke, donde ya existen otros satélites, algunos viejos, otros jóvenes, de configuraciones, tamaños y aplicaciones distintas; de los cuales muchos de ellos reciben y transmiten señales en las mismas frecuencias que el satélite recién llegado, el cual las usara por muchos años. Afortunadamente, aunque todos son vecinos, no se encuentran colocados en el mismo punto, de hecho están separados entre sí por 2 ó 3 grados de arco equivalentes a una distancia de 1,500 a 2,000 kilómetros respectivamente, con lo cual se garantiza que no exista ningún riesgo de interferencia radioeléctrica entre ellos. Además, la posición en longitud de cada uno depende de la zona geográfica que se encargue de intercomunicar.

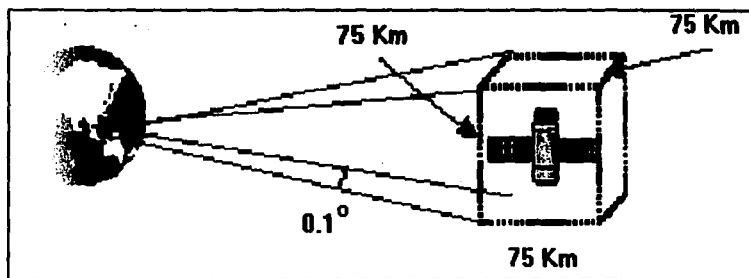
De cualquier forma hay ciertas secciones del cinturón de Clarke que son más codiciadas que otras y por lo tanto se encuentran sumamente pobladas. La zona de mayor tráfico internacional de señales radioeléctricas vía satélite es la del Océano Atlántico, debido a que a sus lados se encuentran los países industrializados de América del Norte y Europa. Por lo que se refiere a tráfico interno o domestico de señales, se intuye que una de las zonas más congestionadas, por la gran demanda de servicios que allí hay, tanto en variedad como en cantidad, es la sección del arco ecuatorial comprendida por las longitudes geográficas de México, Estados Unidos y Canadá, así como las longitudes más cercanas a sus territorios.

Regresando al satélite recién llegado al cinturón de Clarke, este no debe causar problemas de interferencia ni degradaciones de calidad de las señales recibidas o transmitidas por él, y por lo tanto debe permanecer ahí lo más "fijo" que se pueda. Es decir, que aun cuando se este moviendo a gran velocidad alrededor de la Tierra para mantener su posición geostacionaria, no debe desviarse de su trayectoria y tampoco debe cambiar la orientación de su cuerpo con respecto a la superficie terrestre.

Sin embargo, el satélite no puede cumplir del todo con los requisitos anteriores, ya que varias fuerzas se encargan de dificultarle su tarea, dichas fuerzas reciben el nombre de Fuerzas Perturbadoras, y estas son, la Fuerza Del Campo Gravitacional de la Tierra, que es la que más afecta ya que el campo no es esféricamente uniforme pues la distribución de la masa no es homogénea; la Fuerza de Atracción de La Luna y del Sol; los Campos Magnéticos y Colisiones con Meteoritos; y la Radiación Solar.

Para que el satélite cumpla con los requisitos ya mencionados se le debe de proporcionar dispositivos propulsores y giroscopicos que lo ayudaran a **corregir** las perturbaciones recibidas por las fuerzas y mencionadas teniendo como rango para dicha tarea una caja imaginaria en el espacio con las dimensiones que se muestran en la siguiente imagen.

### Posición del satélite en su órbita



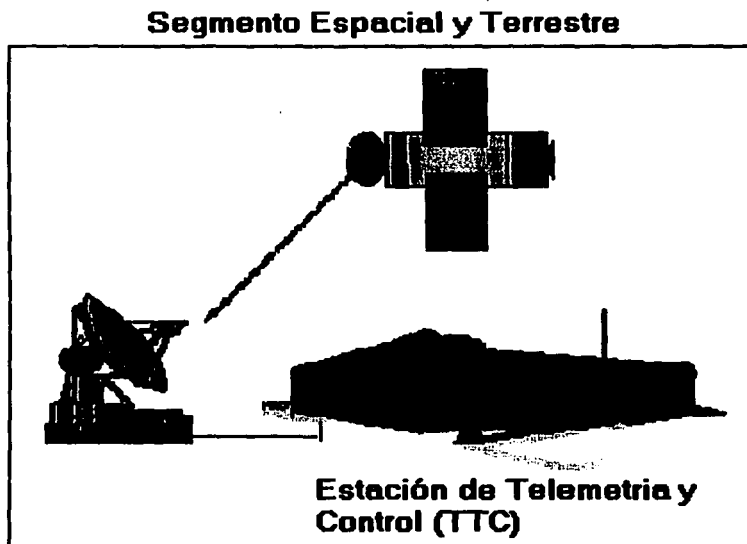
## 1.6 SEGMENTO ESPACIAL Y TERRESTRE

### Segmento Espacial

El Segmento Espacial contiene al Satélite y al Sistema Terrestre De Monitoreo.

El Sistema Terrestre De Monitoreo esta encargado de revisar y controlar todas las funciones del Satélite. El lugar donde se realizan dichas funciones se le conoce como Estación De Telemetría y Control (TTC).

En la siguiente figura se ilustra dicha operación.





## Enlaces De La Estación de Telemetría y Control (TTC)

Las señales de **Comando** son las que permiten efectuar las correcciones en la operación y funcionamiento del satélite a control remoto, como cambiar la ganancia de los amplificadores, cerrar algún interruptor, conmutar de transponedor, modificar la orientación de la estructura, o bien (durante la colocación en órbita) extender los paneles solares, mover las antenas y encender el motor de apogeo. Todas las señales de control van codificadas, por razones obvias de seguridad, y la mayor parte de los sistemas que operan actualmente utilizan una secuencia en la que el satélite primero transmite al centro de control los comandos que haya recibido, estos son verificados en la Tierra, y si se comprueba que las ordenes fueron recibidas correctamente, entonces el centro de control transmite una señal de ejecución. Al recibirla, el satélite procede entonces a efectuar los cambios ordenados.

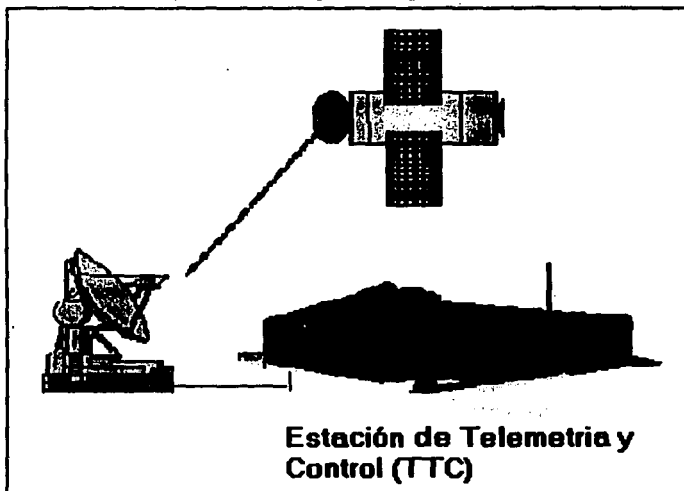
El rastreo se efectúa mediante la transmisión de varias señales piloto, denominados tonos, desde la estación terrena de control hacia el satélite. Normalmente se utilizan de 6 a 7 tonos distintos, cuya frecuencia es de unos cuantos kilohertz, y que modulan sucesivamente en fase con la señal portadora de la estación terrena de control; el satélite recupera los tonos y remodula con ellos a su propia portadora, para retransmitirlos hacia la Tierra, en donde son detectados por el centro de control. Las señales recibidas en Tierra se comparan en fase con las transmitidas originalmente, y las diferencias obtenidas permiten calcular la distancia a la que se encuentra el satélite, con precisión de unas cuantas decenas de metros.

La transmisión de las señales de telemetría y la retransmisión de los tonos de rastreo hacia la Tierra se realiza a través de un mismo amplificador a bordo del satélite, al igual que con las señales de comando que se hayan recibido, para que se verifiquen antes de que sean ejecutadas. Durante los años de vida operacional del satélite, este amplificador es el mismo de alguno de los transponedores empleados para las comunicaciones en general, ya que las señales transmitidas y recibidas por el subsistema de telemetría, rastreo y comando ocupan muy poco ancho de banda y

pueden compartir el mismo amplificador de banda C ó Ku con otro tipo de señales de comunicaciones. Solamente durante las maniobras de colocación en órbita es común utilizar un amplificador que funcione a frecuencias más bajas que las de la banda C ó Ku; en esta etapa importante de su lanzamiento se emplean bandas de VHF y S, cuyas frecuencias son, respectivamente, de aproximadamente 140 MHz y 2 GHz, y las transmisiones y recepciones se efectúan a través de la *antena de rastreo, comando y telemetría*.

El siguiente cuadro muestra los enlaces de La Estación de Telemetría y Control.

### Segmento Espacial y Terrestre



## Funciones de las Unidades de TTC

Las Funciones de las Unidades de TTC se resumen en los siguientes puntos.

- Recibir las señales de control de la Tierra para iniciar el modo de operación del equipo.
- Transmitir los resultados de las mediciones.
- Transmitir información concerniente a la operación del satélite.
- Verificar la ejecución de los comandos.
- Monitorear la distancia entre la Tierra y el satélite, así como su velocidad.



El funcionamiento de una estación de TTC en México de forma resumida es el siguiente:  
Este se lleva a cabo en CONTEL (Conjunto de Telecomunicaciones) en Iztapalapa, Cd. de México.

Y tiene como funciones :

- **Procesar datos de Telemetría.**
- **Determinar la posición y el estado del satélite.**
- **Activa a los actuadores de orientación.**
- **Supervisa los servicios de Telecomunicaciones.**
- **Supervisa a los usuarios de las Telecomunicaciones.**

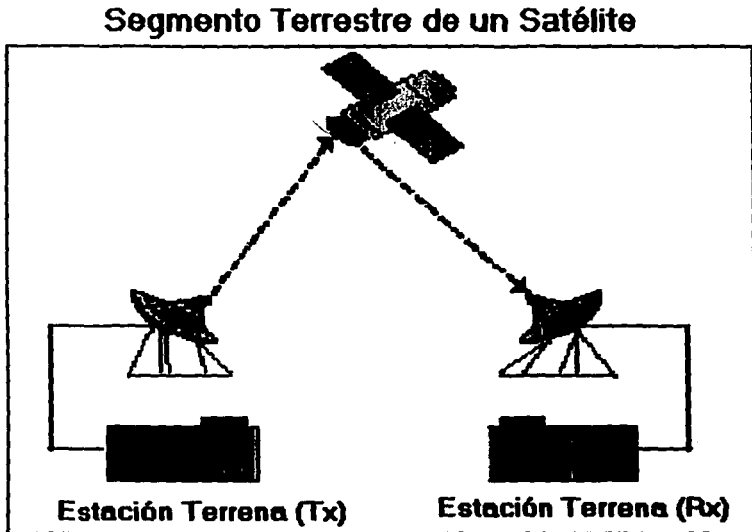
Sus sistemas cuentan con:

- **Antena de 11 metros para los satélites Solidaridad 1 y 2, y el Salmex 5.**
- **Antena de 12 metros versátil para soporte.**
- **Centro de control, telemetría, rastreo y comando.**

### Segmento Terrestre de un Satélite

Este segmento esta formado por las estaciones terrenas; es decir, por las antenas y sistemas de procesamiento de señales (multiplexación, codificación, aleatorización, transmisión y recepción).

La siguiente figura ilustra al Segmento Terrestre de un Satélite.



## 1.7 SUBSISTEMAS DE UN SATELITE

Los siguientes puntos resumen a Los Subsistemas de un Satélite.

### **Estructura Física:**

Provee Protección mecánica al satélite en sí. Se desea que la estructura sea lo más grande posible para soportar las antenas, contener los equipos electrónicos y almacenar suficiente energía y baterías solares, ya que esto influye en el tiempo de vida útil del satélite. Las dimensiones de la estructura están limitadas por la capacidad de los lanzadores para transportarlos y colocarlos en su órbita.

### **Control de Orientación:**

Estabiliza al satélite para evitar que se salga de dirección, también mantiene las antenas en su orientación correcta. Existen 2 métodos estabilizadores; uno es el de Giro Estabilizado, el cual consiste en mantener al satélite girando en su eje a 100 RPM; el otro es el de Estabilización Triaxial, en el cual los acelerómetros detectan cambios en las 3 posiciones y corrigen por medio de estabilizadores giroscópicos (rueda de momento).

### **Suministro de Energía:**

El satélite es alimentado por baterías solares y por baterías de níquel-cadmio durante los eclipses.

### **Equipo de Telemetría TTC:**

Constantemente verifica la órbita del satélite sin desviaciones respecto a la Tierra; también supervisa la calidad de la señal de recepción para ajustar la ganancia. Esta información se envía constantemente a la Tierra (segmento espacial).

### Equipo de Propulsión:

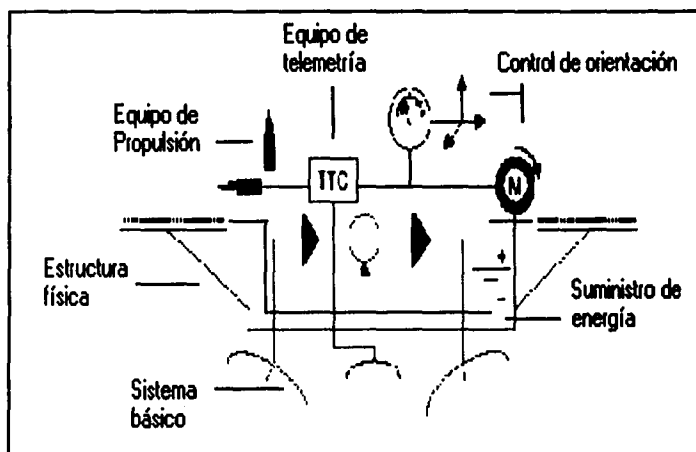
Sistema de pequeños cohetes propulsores que corrigen cualquier desvío del satélite de su órbita original. Requiere de almacenamiento de combustible, lo cual determina la vida útil del satélite.

### Sistema Básico:

Realiza la función principal del satélite, que consiste en recibir la señal, amplificarla, trasladarla en frecuencia, darle potencia y retransmitirla a la Tierra.

La siguiente figura ilustra a los Subsistemas de un Satélite.

## Subsistemas de un Satélite



## 1.8 HACES Y COBERTURAS

Las antenas reciben las señales de radiofrecuencia provenientes de las estaciones terrenas transmisoras, y después de que son procesadas en el satélite, la transmite de regreso hacia la Tierra, concentradas en un haz de potencia. En algunos casos, las antenas que reciben son distintas de las que transmiten, pero también es posible que una sola antena reciba y transmita al mismo tiempo, utilizando para ello frecuencias y elementos de alimentación diferentes. Los elementos de alimentación o alimentadores, son generalmente antenas de corneta conectadas a guías de onda, que emiten energía hacia un reflector parabólico, o bien la captan proveniente de este último para entregársela a los equipos receptores.

Paradójicamente, una antena parabólica chica puede recibir y transmitir dentro de una extensión territorial muy grande, mientras una que una antena de mayor tamaño, que opera a la misma frecuencia, solamente puede hacerlo dentro de una zona geográfica más pequeña.

Esto debido a que cuando más grandes son las antenas, tienen la propiedad de una mayor capacidad para concentrar la energía en un haz electromagnético muy angosto, que ilumina pocas unidades cuadradas, pero que las irradia con niveles muy altos de densidad potencia; esto facilita el diseño y reduce el costo de las estaciones terrenas receptoras. Por otra parte mientras más alta sea la frecuencia a la que una antena de dimensiones constantes trabaje, mayor es su capacidad de concentración de energía; esta es una característica propia de las antenas parabólicas y, en general, de todas las antenas llamadas "de apertura" cuya capacidad de concentrar la potencia en un haz invisible de radiación o iluminación muy angosto es función directa de sus dimensiones eléctricas y no de las físicas.

### La dimensión eléctrica



La dimensión eléctrica de una antena es igual a su dimensión física dividida entre lo que mide la longitud de onda a la frecuencia de operación, o sea, es número de longitudes de onda que cabrían alineadas en su apertura o boca.

La huella de iluminación es la intersección del haz radiado por la antena con la superficie de la Tierra.

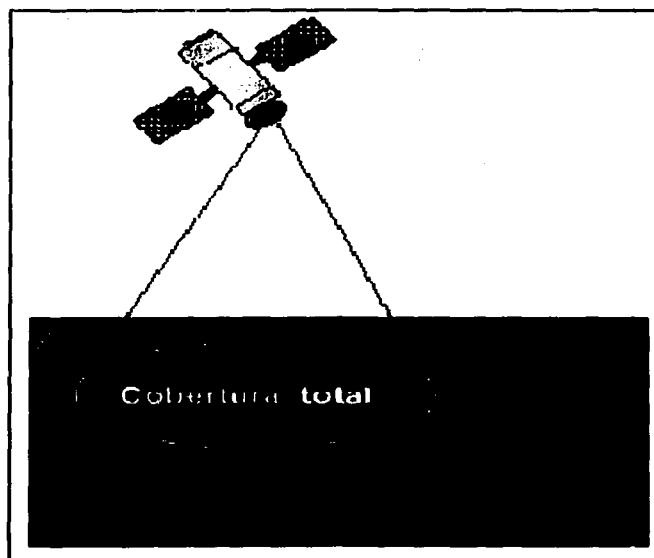
A continuación veremos dos tipos de huella o cobertura de los satélites.

#### **Satélites "Single Beam" (De Cobertura Sencilla o de un Solo Haz)**

Estos tienen como características:

- La interconexión de muchas estaciones (cobertura extensa).
- La disposición de presupuesto favorable, es decir cobertura reducida.
- La posibilidad de tener más ganancia reduciendo la cobertura.

En la siguiente página, la figura ilustra lo que es un Satélite Single Beam.

**SATELITES "SINGLE BEAM"**

### **Satélites "Multi Beam" (Satélites de Cobertura Múltiple o Multi-Haz)**

Un Sistema Satéltal Multi Beam se caracteriza por:

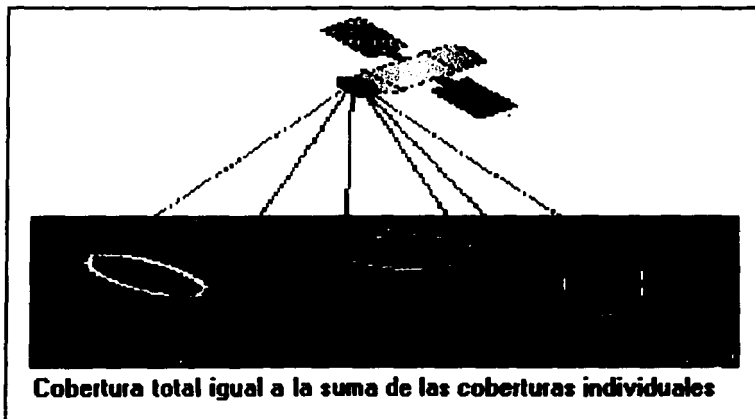
Una mejora en el desempeño de la red.

La extensión de la cobertura total guardando una aceptable calidad de recepción. Esto gracias a la conjunción de varios haces con ángulos reducidos, pero con un incremento en las ganancias de las antenas.

La posibilidad de dar forma especial al contorno de la cobertura como veremos a continuación en los diferentes tipos de haces.

La siguiente figura muestra la cobertura de un Satélite Multi Beam.

#### **SATELITES MULTI BEAM**



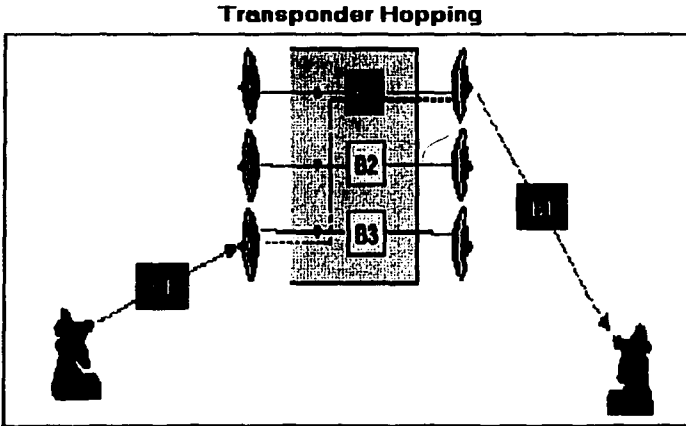
### Técnicas de interconexión entre regiones.

Para la interconexión de coberturas en un satélite multi beam, se emplea alguna de las siguientes técnicas:

#### Transponder Hopping

En esta técnica el ancho de banda asignado al sistema se divide en sub-bandas, tantas como el número de haces que haya en el sistema. Se transmite a una frecuencia portadora correspondiente al haz de bajada; por medio de filtros, se retransmitirá solo por la antena asignada a la región destino. Esta técnica se emplea cuando el número de haces es pequeño.

La siguiente figura ilustra la técnica de Transponder Hopping



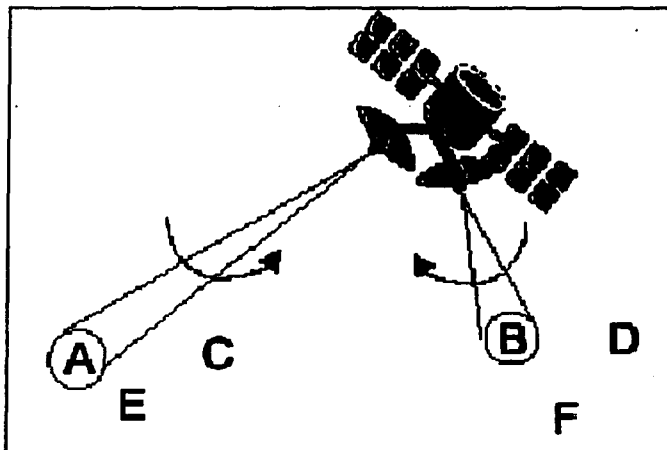
## Beam Scanning

En esta técnica, se cubren varias regiones con el mismo haz, *iluminando* primero una región y luego otra. Este movimiento de la antena, es realizado por un subsistema de orientación, tanto para el enlace de subida como para el enlace de bajada.

La conexión del punto A con el punto B, su duración y las siguientes conexiones entre puntos o regiones, se determinan en el segmento terrestre (Estaciones Terrestres).

La siguiente figura ilustra la técnica de Beam Scanning

### Beam Scanning

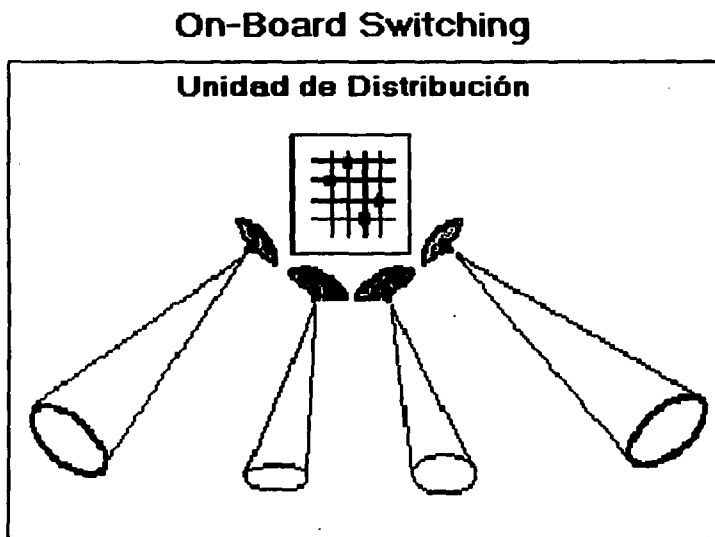


## On-Board Switching

Esta técnica se basa en el principio de una matriz de conmutación. Cada estación terrena tiene un tiempo de conmutación asignado para transmitir, y recibe las señales de las estaciones restantes en tiempos específicos. La Unidad de Distribución establece la conexión entre un elemento de un haz y otro.

Es un método digital y emplea sistemas de almacenamiento de datos previos a la retransmisión. Con él es posible establecer configuraciones punto-punto, punto-multipunto y viceversa.

La siguiente figura ilustra la técnica de On-Board Switching.



## Tipos de Haces

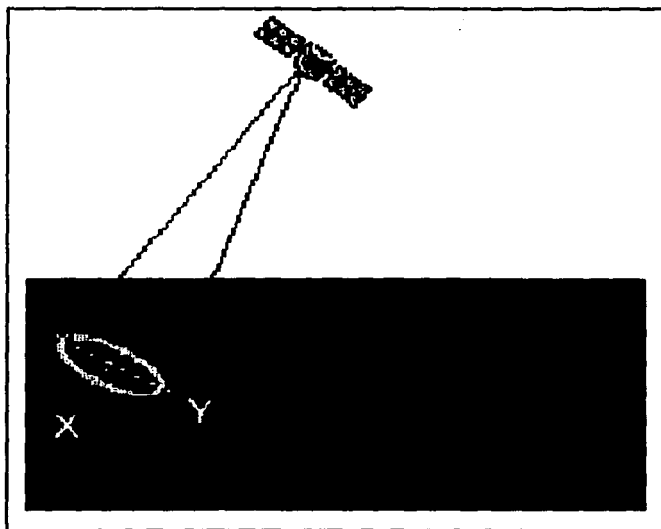
A continuación podemos ver los diferentes Tipos de Haces.

### Elípticos:

En este tipo de haz, las pequeñas variaciones en frecuencia, resultan en cambios en los diámetros  $x$ ,  $y$ .

La siguiente figura ilustra el tipo de haz elíptico.

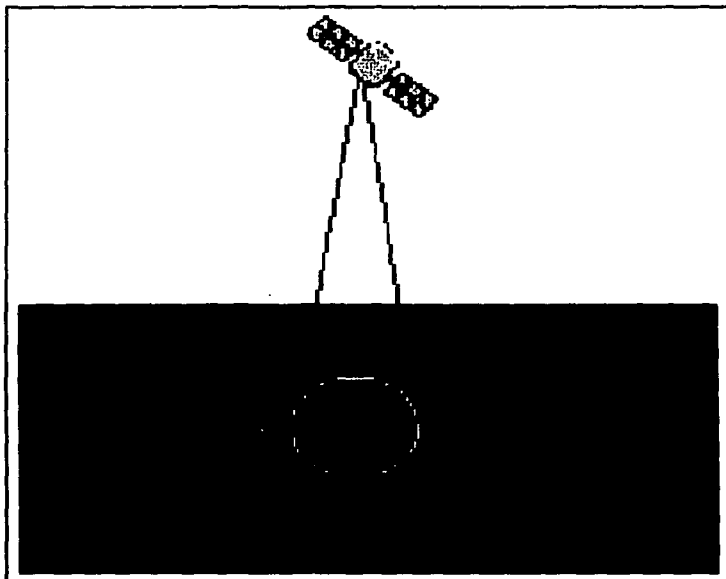
### Haz Elíptico



**Circular:**

En este tipo de haz, el ángulo de apertura puede variar, logrando coberturas reducidas o globales.

La siguiente figura ilustra el tipo de Haz Circular.

**Haz Circular**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

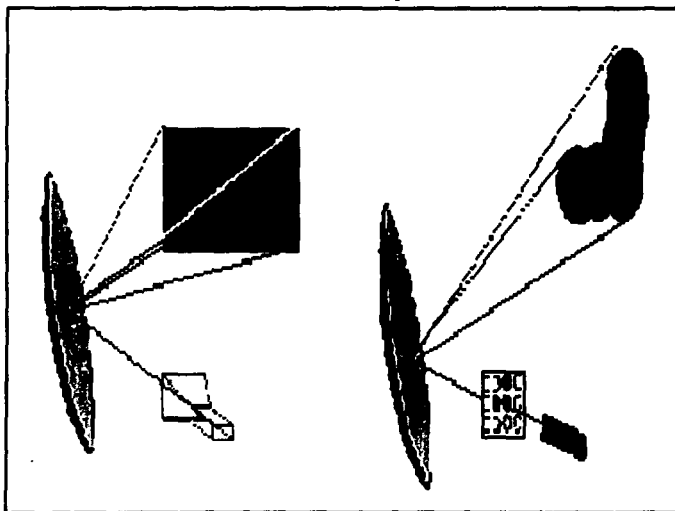


**De perfil específico:**

En este tipo de haz, dando la forma deseada al elemento radiador, el haz toma la misma forma dejándola como huella. También se puede dando la forma deseada con varios elementos radiadores.

La siguiente figura ilustra le Haz de Perfil Específico.

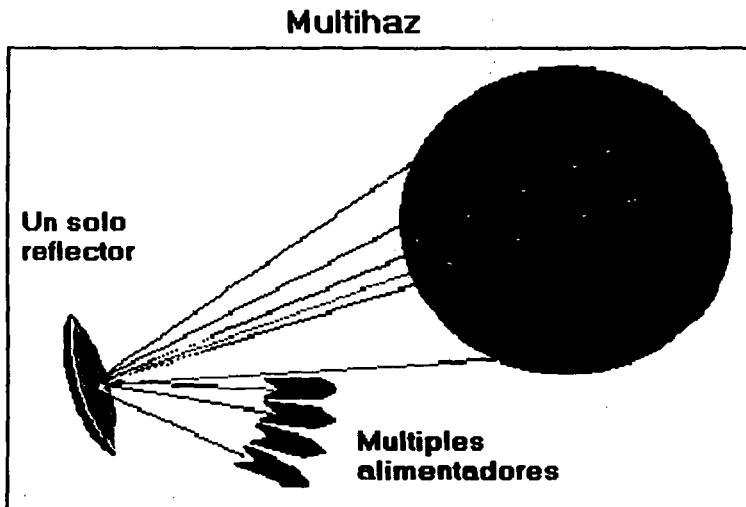
## Haz de Perfil Específico



**Multihaz**

En este tipo de ha, dirigiendo adecuadamente varios haces se logra una cobertura geométrica deseada; esta puede ser de secciones aisladas o continuas: Habrá que recordar que en multihaz se pueden emplear las mismas frecuencias y diferentes polarizaciones.

La siguiente figura ilustra el tipo de Multihaz.



## Enlaces Intersatélitales

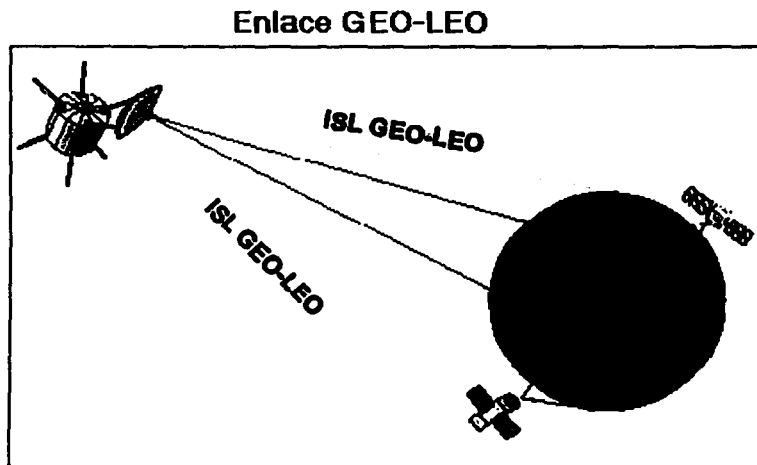
Los Enlaces Interstélitales pueden considerarse como un haz particular de un satélite multi beam; evidentemente para comunicaciones bidireccionales se tendrán dos haces de enlace intersatélital.

Por la naturaleza de las órbitas de los satélites a intercomunicar, los enlaces se clasifican en:

### Enlaces GEO-LEO

Estos enlaces sirven para establecer un contacto permanente, via un satélite geoestacionario, entre varias estaciones y un grupo de satélites de órbita baja (500 a 1,000 km). Usando un GEO no se requieren tantos LEOs para cubrir áreas mayores; el GEO constantemente será visible para las estaciones terrenas y para los LEOs.

La siguiente figura ilustra el enlace GEO-LEO.



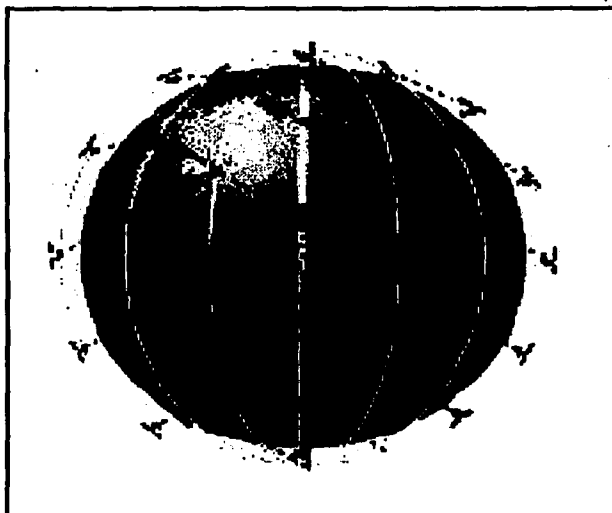
## Enlaces LEO-LEO

El creciente congestionamiento de satélites geoestacionarios y las ventajas de los satélites de órbitas bajas, han llevado a pensar en enlaces entre LEOs.

Una característica de los satélites de órbita baja, es su limitada duración del tiempo de comunicación, así como su pequeña cobertura. Lo anterior puede solucionarse con una red a base de enlaces entre satélites LEO, tal es el caso del proyecto IRIDIUM para PCS.

La siguiente figura ilustra el enlace LEO-LEO.

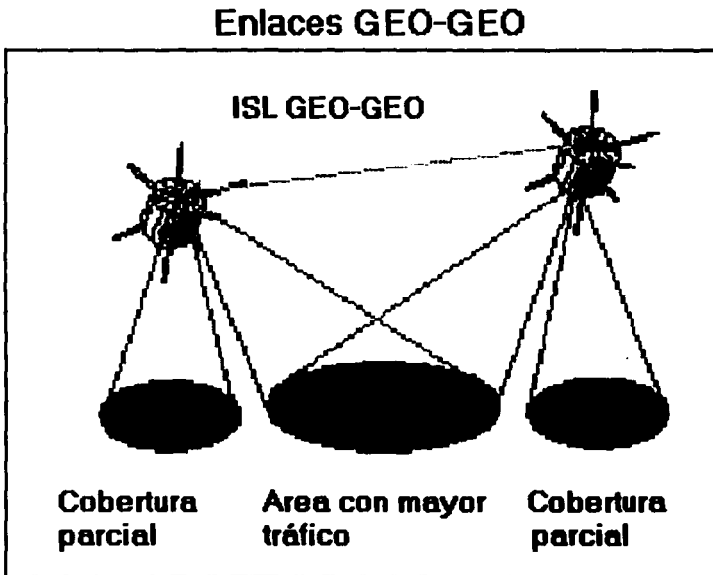
## Enlace LEO-LEO



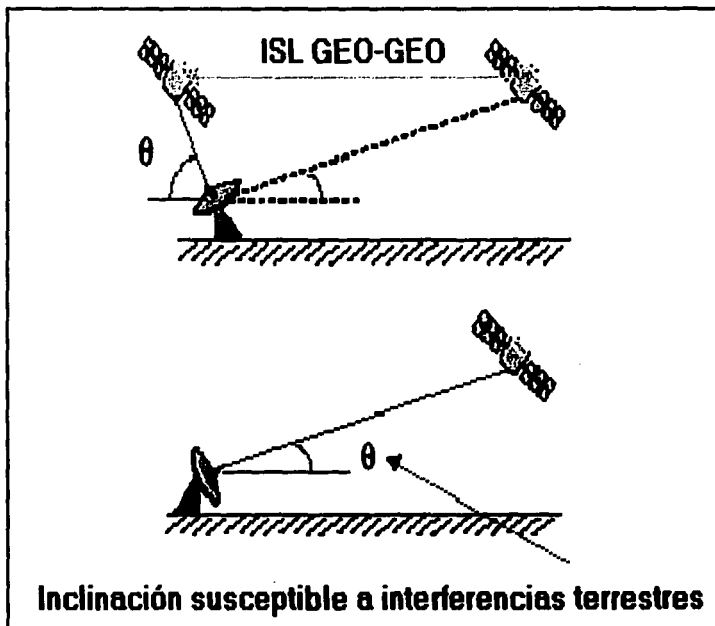
## Enlaces GEO-GEO

La interconexión de GEOs se debe a las siguientes razones:

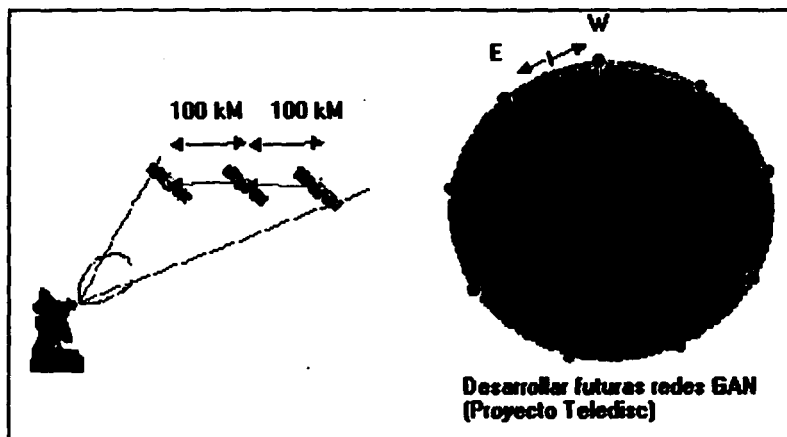
Incrementar la capacidad de un sistema y ampliar su cobertura total (véase la siguiente figura).



Mejorar la recepción ampliando el ángulo mínimo de elevación (véase la siguiente figura).



Incrementar la capacidad equivalente a un satélite (véase la siguiente figura).



## 1.9 BANDAS DE FRECUENCIAS

La capacidad de tráfico de un satélite está limitada por dos factores, uno es el ancho de banda y el otro es la potencia de los amplificadores.

Por lo que respecta al ancho de banda, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) ha asignado para el servicio fijo por satélite las bandas C, X, Ku y Ka, con frecuencias centrales aproximadas de los enlaces ascendentes y descendentes de 6/4 GHz, 8/7 GHz, 14/11 GHz ó 14/12 GHz, y 30/20 GHz, respectivamente; dependiendo de la región hay variaciones entre los límites inferior y superior de cada una de estas bandas.

A continuación presentamos una breve descripción de cada una de las bandas.

**Banda L (1.4/1.6 GHz) :** Esta banda es usada para las comunicaciones móviles, y usa antenas del tipo Yagui o Helicoidal, de dimensiones relativamente pequeñas.

Una particularidad de esta banda es que se distribuye en menos canales con potencias mayores, lo que permite una recepción suficiente en la antena de barcos y aviones.

**Banda C (6/4 GHz) :** Esta fue la primera banda en utilizarse para comunicaciones satelitales comerciales. En un ancho de 1 GHz, los ruidos naturales son mínimos, además la absorción de la atmósfera no es crítica. Existen interferencias producidas por servicios terrestres que también utilizan esta frecuencia.

**Banda X (8/7.5 GHz) :** Esta al igual que la banda S, esta centrada en un ancho de banda de 2 GHz, es empleada en aplicaciones militares con satélites geostacionarios, en comunicaciones gubernamentales y en experimentos.



**Banda Ku (14/11 GHz) :** La banda Ku tiene sub-bandas que no son compartidas con radioenlaces terrestres. Por lo general se usa para servicios directos con antena de radio pequeño.

Las frecuencias de subida y de bajada varían según la región del mundo, pero son fijadas por acuerdos internacionales. Los servicios pueden ser uni o bidireccionales, entre dos o más puntos de la Tierra, o bien para difusión.

**Banda Ka (29/19 GHz) :** La banda Ka se emplea en casos muy especiales. Es posible transmitir haces muy delgados y dirigidos, pero a estas frecuencias, las condiciones ambientales afectan de sobremanera. Actualmente se están llevando a cabo desarrollos para la transmisión de señales de banda ancha como multimedia.

El siguiente cuadro ilustra a las bandas con sus respectivas frecuencias y usos.

### Bandas de Frecuencias

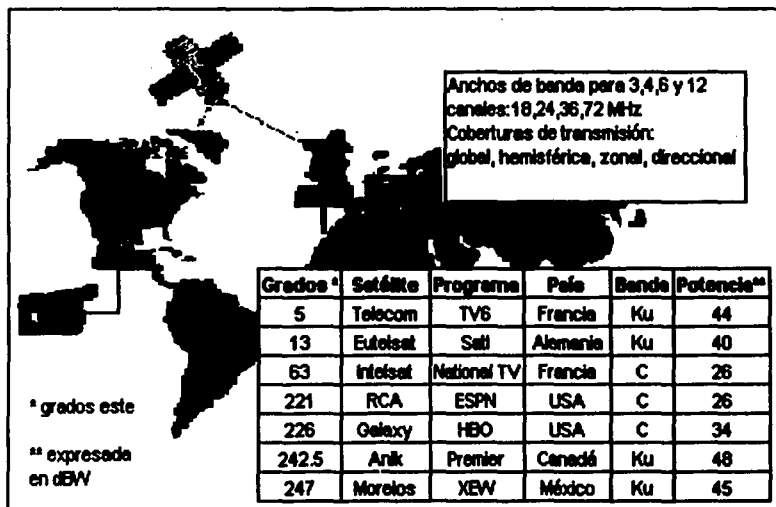
Banda	Subida (GHz)	Bajada (GHz)	Usos
L	1.600	1.400	Comunicaciones Móviles
C	5.925 - 6.425	3.700 - 4.200	Punto a punto
	5.850 - 7.075	3.400 - 4.200 4.500 - 4.800	Punto a multipunto
X	7.925 - 6.425	7.250 - 7.750	Militar
Ku	14.000 - 14.500	10.950 - 11.200 11.450 - 11.700	Punto a multipunto
	12.750 - 13.250 14.000 - 14.500	10.700 - 11.700	Broadcast
	14.000 - 14.500	11.700 - 12.200	
	17.300 - 17.800	12.250 - 12.750	
Ka	27.500 - 31.000	17.700 - 21.200	Experimental

## 1.10 PRINCIPALES APLICACIONES DE LOS SATELITES

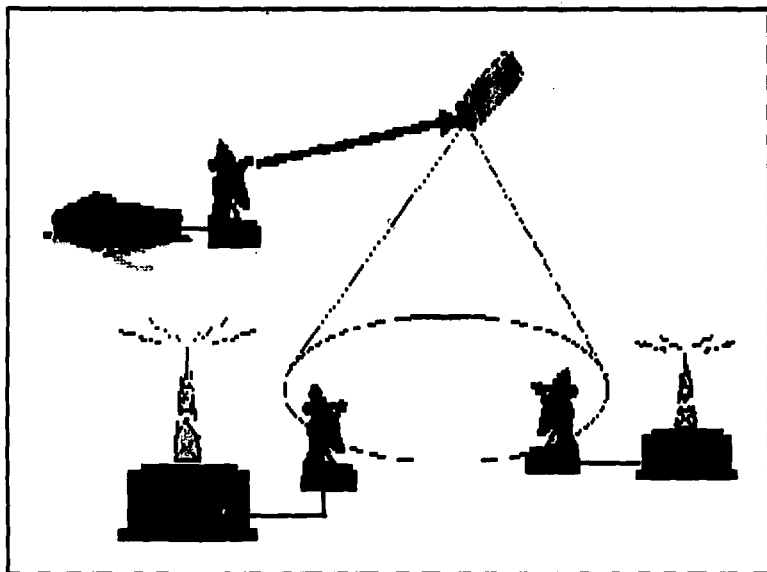
A continuación presentamos las principales aplicaciones de los Satélites:

- Enlaces troncales para telefonía de larga distancia internacional.
- Enlaces transcontinentales de radio y televisión. Las imágenes siguientes ilustran este tipo de enlaces.

### Enlaces de TV

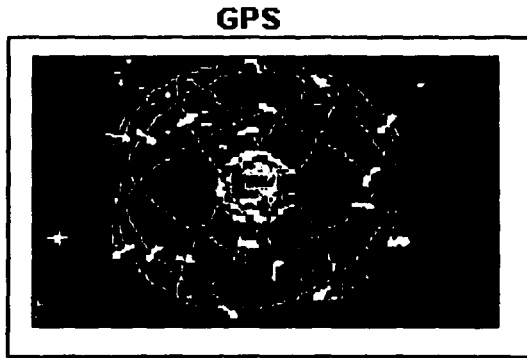


## Radiodifusión



- Comunicaciones para barcos y aviones.

- **Sistemas de ubicación (GPS).** La siguiente imagen ejemplifica al sistema de ubicación.



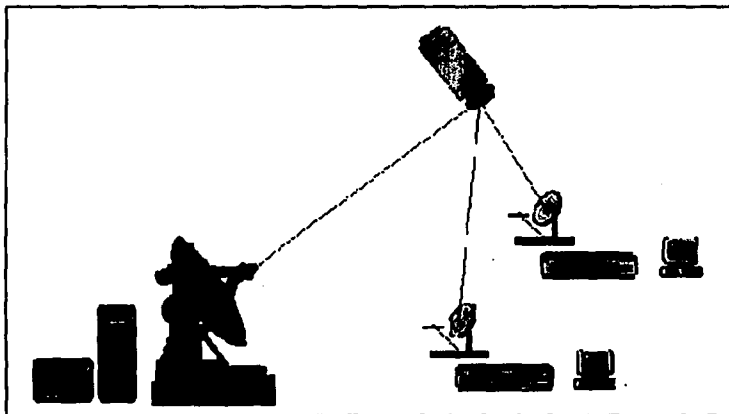
**Sistema de Posicionamiento Global (GPS) :** Es una constelación de 24 satélites en 6 órbitas circulares a 55 grados del plano polar, con 4 satélites cada una. El tiempo de rotación de cada satélite es de 12 horas. GPS permite la visibilidad de entre 5 y 8 satélites desde cualquier punto de la Tierra.

El segmento espacial del GPS envía constantemente señales, cubriendo toda la superficie de la Tierra. El segmento terrestre del GPS convierte las señales de radio en información útil para la navegación, posicionamiento e investigación. Se requieren las señales de un mínimo de 4 satélites para proporcionar los datos de longitud, latitud, altitud y tiempo. La exactitud de la información va desde 100 m hasta 1 mm, con incremento en el costo de los equipos (D-GPS). El control maestro se encuentra en la Falcon Air Force Base en Colorado, USA.

- Telefonía rural.

- Comunicación a puntos de difícil acceso.
- Cobertura de eventos especiales.
- Recolección de información de puntos diversos.
- Redes privadas de comunicación (VSAT). La siguiente imagen ilustra esta aplicación.

### Redes VSAT

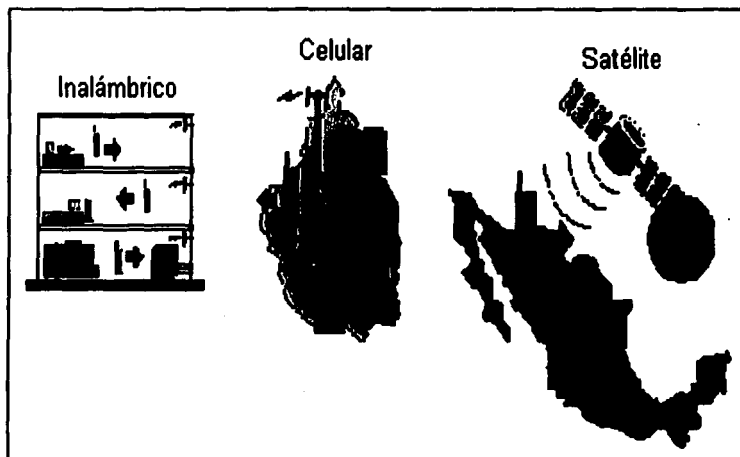


Una red VSAT permite la transmisión de datos entre una estación central y una terminal. Se emplea un satélite geostacionario así cada terminal tiene línea de vista permanente con el satélite. La capacidad de un transpondedor es de aproximadamente 100 Mbps.

- Comunicaciones en caso de desastre.

- Redes de comunicaciones móviles. La siguiente imagen ilustra esta aplicación.

## PCS



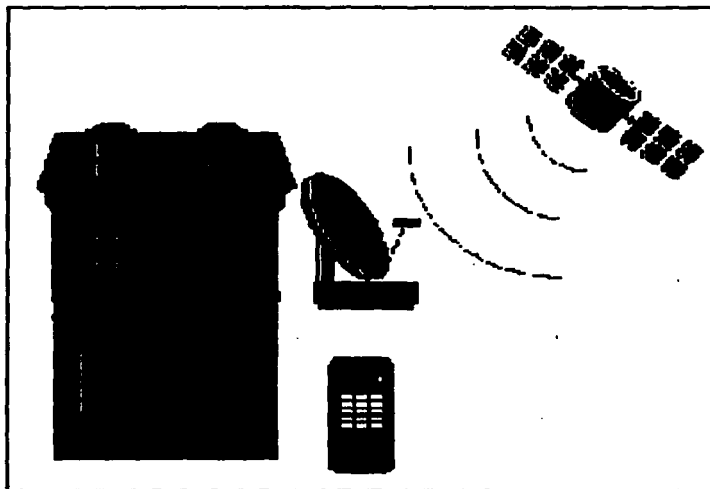
PCS involucra los conceptos de portabilidad, movilidad, "UPIN" (Número de Identificación Personal Universal), integrando voz, datos y vídeo.

Actualmente, en Europa, el ETSI trabaja sobre el concepto UMTS (Universal Mobile Telecommunication System); el cual pretende ofrecer comunicaciones personales móviles hasta 2 Mbps.

Por su parte el UIT-T ha definido un concepto similar, conocido como FPLMTS (Future Mobile Telecommunication System), buscando la compatibilidad de las redes ISDN y B-ISDN con las redes móviles.

- Difusión directa de TV comercial restringida (DTH). La siguiente imagen ilustra esta aplicación.

## DTH



El servicio de televisión directa emplea señales digitales en broadcasting. El usuario tiene una antena de plato de aproximadamente 60 cm y un decodificador. Se transmite en banda Ku a velocidades de entre 23 y 30 Mbps.

## **1.11 VENTAJAS, DESVENTAJAS Y COMPARACIONES DE LOS SATELITES**

Podemos decir que las principales ventajas de los satélites son:

- Rapidez de instalación.
- Facilidad de expansión.
- Cambio de configuración.
- Cobertura amplia.
- Introducción de nuevos servicios.
- Un solo repetidor muy vigilado.
- Disponibilidad del 99.99 %.
- Servicio de un solo proveedor.

Las principales desventajas de los satélites son:

- Que tienen tiempo de vida limitado (aproximadamente 10 años).
- Que sufren un retardo considerable en la señal.
- Que tienen un alto costo de instalación.



- Que el servicio es de un precio alto:
- Que las transmisiones son sensibles a los efectos climáticos.

El siguiente cuadro nos muestra la comparación del satélite con otros medios en diferentes parámetros.

	Distancia repetidores	Punto a punto Punto a multipunto	Costo instalación	Vida útil
Satélite	Solo uno (el satélite)	Ambos	Alto	Limitada
Radiodifusión	Repetidores locales	Punto a multipunto	Moderado	Larga
Coaxial Cobre	Corta 2 - 10 Km	Punto a punto	Alto	Larga
Microondas	Media 25 a 50 Km	Punto a Punto	Alto	Larga
Fibras ópticas	Larga Hasta 90 Km	Punto a Punto	Alto	Larga

	Efectos Climáticos	Movilidad	Operación	Capacidad
Satélite	Si	Muy amplia	Alto	Media
Radiodifusión	No mucho	Posible	Moderada	Baja
Coaxial Cobre	No mucho Humedad	Nula	Moderada	Media
Microondas	Si Lluvias	Nula	Moderada	Media alta
Fibras ópticas	Nulos	Nula	Sencilla	Alta Muy alta

## **CAPITULO 2**

# **CALCULO DE UN ENLACE SATELITAL**

## 2.1 ¿ QUÉ ES EL CÁLCULO DE ENLACE?

Se puede decir que el **Cálculo de Enlace** es un procedimiento que nos permite evaluar la calidad de comunicación existente en un canal de comunicación vía satélite considerando los niveles de **Potencia** en todo el sistema.

El cálculo de enlace vía satélite nos permite obtener los valores de potencia necesaria para comunicar dos o más **Estaciones Terrenas (E/T)** tomando en cuenta las consideraciones físicas relacionadas con el viaje de la señal por el espacio libre, con el procesamiento que recibe por parte de los equipos (entre ellos al satélite mismo), y a la ubicación geográfica de los puntos a comunicar.

En el contexto del diseño de redes satelitales, el cálculo de enlace constituye la base matemática para el dimensionamiento de los equipos que se utilizan en las E/T, en tanto que en la operación de redes no es útil para determinar la cantidad de potencia necesaria para que la comunicación entre dos o más E/T se realice con la calidad deseada.

En todo sistema de comunicación la presencia de ruido es algo invariable que genera una degradación de señal útil. **La Relación Portadora a Ruido (C/N)**, se refiere a la diferencia existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia de ruido existente en el sistema.

La metodología de cálculo se basa en dividir al cálculo de enlace satelital en tres partes Principales:

- 1) Enlace ascendente
- 2) Enlace descendente
- 3) Evaluación del enlace

Cada una de las partes anteriores aglutinan una serie de conceptos físicos y procedimientos matemáticos con cierta independencia que nos permite manejarlos por separado.

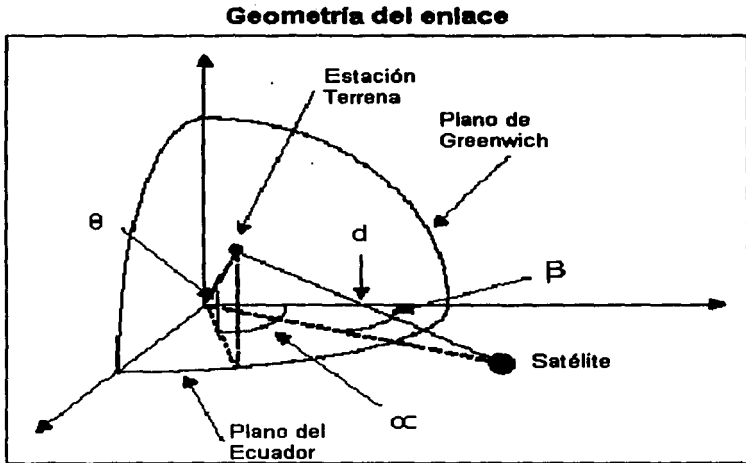
El **Margen de Enlace** es el parámetro que nos indica la calidad total del enlace, que considera a la potencia en el equipo receptor de acuerdo a una calidad esperada en la información recibida y la calidad de la información proporcionada por el enlace, en función de la potencia total de la portadora.

Cuando se diseña un enlace debe tomarse algún **Criterio de Diseño** que fije las condiciones en las que se espera, o bien, se desea que el enlace opere satisfactoriamente, de ahí que una vez establecidos dichos criterios se considera si el margen del enlace es bueno o no; en caso de ser satisfactorio, se da por concluido el cálculo y se procede a la recuperación de los valores correspondientes a los parámetros más relevantes como; la PIRE de la E/T y la PIRE del satélite por portadora, esto es las potencias controlables de nuestro enlace. Para el caso en que el margen del enlace no sea el adecuado se realiza nuevamente el cálculo bajo diferentes condiciones de potencia, para lo cual debemos cambiar el valor de la potencia con la que transmite la E/T, así hasta obtener los resultados deseados.

## 2.2 GEOMETRIA DEL ENLACE

Para orientar una antena hacia un satélite, es necesario conocer el ángulo de elevación y el azimuth.

En la Geometría del Enlace interviene la ubicación *geográfica* tanto del satélite como de las estaciones transmisoras y receptoras. De acuerdo a lo anterior tendremos como datos: la Longitud del satélite, la Longitud y la Latitud de la estación Terrena. Con dicha información podemos calcular la *distancia* que hay entre el satélite y la estación Terrena, el *ángulo de elevación* y el *Azimuth*. La siguiente figura ilustra el punto anterior.



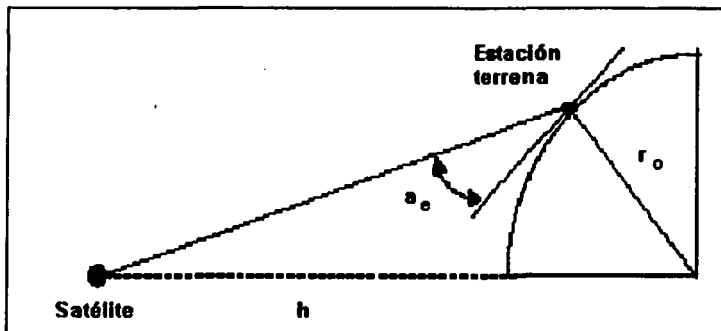
Donde los datos necesarios son:

$\alpha$ , es la longitud de la estación terrena;  $\beta$ , es la longitud del satélite y  $\theta$ , es la latitud de la estación terrena. Calculando;  $d$ , que es la distancia;  $\alpha_e$ , que es el ángulo de elevación y  $\alpha_z$  que es el Azimuth.

## ANGULO DE ELEVACION

Es el ángulo formado entre la recta que une a la estación terrena y al satélite y una horizontal que es tangente en el punto de la estación terrena. A un ángulo de elevación más pequeño, la distancia de propagación de una onda que debe atravesar la atmósfera de la tierra es mayor. Como cualquier onda propagada através de la atmósfera de la tierra, esta sufre absorción y también puede ser severamente contaminada de ruido. Por consiguiente, si el ángulo de elevación es demasiado pequeño y la distancia que la onda esta dentro de la atmósfera de la tierra es demasiado larga, la onda puede deteriorarse al grado de proporcionar una transmisión inadecuada. Generalmente, 5 grados es considerado como el ángulo mínimo aceptable de elevación. La siguiente figura ilustra el punto anterior

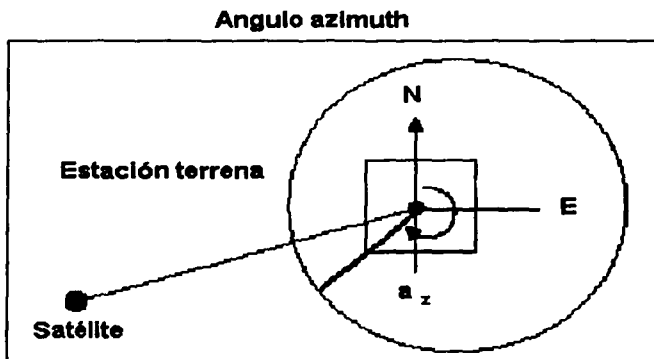
### Ángulo de elevación



NOTA: en la gráfica se muestra el plano que une a la estación terrena con el satélite.

## AZIMUTH

Es el ángulo que se gira para orientar la antena hacia el satélite en el eje norte – sur, en el plano tangente a la tierra en la estación terrena. Es medido en dirección al sentido de las manecillas del reloj en grados desde el norte verdadero. La siguiente imagen ilustra este punto.



A continuación presentamos un cuadro que muestra las fórmulas empleadas y los pasos a seguir para el cálculo de los ángulos de elevación y de azimut.

### Calculo de los ángulos de elevación y azimut

**Paso 1.- Se calcula el ángulo z :**

- $z = \text{Cos}^{-1} [\text{Cos } \theta \text{ Cos } (\alpha - \beta)]$

**Paso 2.- Se calcula la distancia d**

- $d = [r_0^2 + (h + r_0)^2 - 2r_0 (h + r_0) \text{Cos } z]^{1/2}$

- Donde  $r_0 = 6,378$  km y  $h = 35,786$  km

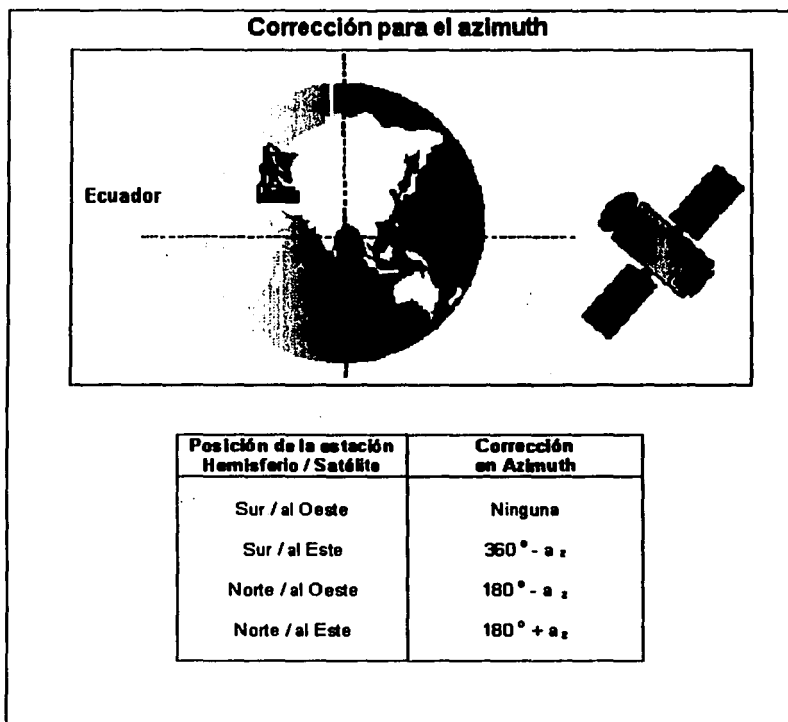
**Paso 3.- Se calcula el ángulo de elevación  $a_e$**

- $a_e = \text{Cos}^{-1} [(d^2 - h^2 - 2hr_0) / (2dr_0)] - 90^\circ$

**Paso 4.- Se calcula el azimut  $a_z$**

- $a_z = \text{Cos}^{-1} [\text{Tan } \theta \text{ Cot } z]$

El ángulo de azimuth se debe de corregir en función de la ubicación que existe entre el satélite y la estación terrena. Para efectuar dicha corrección debemos tomar en cuenta el siguiente cuadro.





## 2.3 TIPOS DE ATENUACIONES

La onda radiada de una antena terrena como cualquier onda propagada através de la atmósfera de la tierra, sufre absorción y también puede ser severamente contaminada de ruido. Dando como resultado una serie de atenuaciones en dicha señal.

Las atenuaciones más comunes son:

**Atenuación en el espacio libre ( free loss space ).-** Esta depende de la frecuencia de operación y de la distancia entre el satélite y la estación terrena. Se calcula con la misma expresión que se usa en enlaces de microondas terrestres. El siguiente cuadro muestra la formula de la atenuación en espacio libre.

### Atenuación en Espacio Libre (FSL)

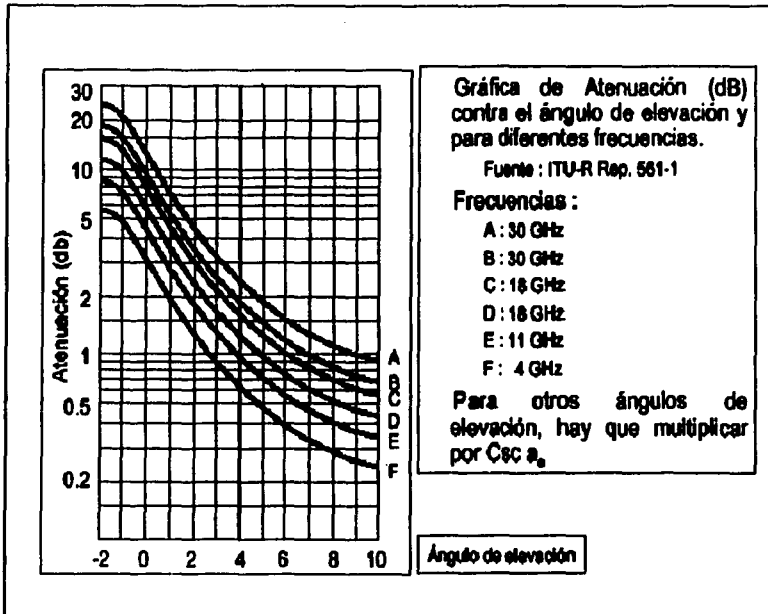
$$FSL = 92.44 + 20 \log (D_{km}) + 20 \log (F_{GHz})$$



**Atenuaciones por absorción atmosférica.-** estas se deben principalmente al efecto de vapor de agua y de oxígeno presentes en la atmósfera. La altura sobre el nivel medio del mar modifica otros factores que influyen como: la presión (en atmósferas) y la temperatura (en ° C). Estas se incrementan con la frecuencia (siendo despreciables a menos de 10 GHz). El efecto de estas atenuaciones disminuye al aumentar el ángulo de elevación. Para determinar la atenuación esta se obtendrá en base a estimaciones tomadas de diversas gráficas.

A continuación se muestra una de estas gráficas.

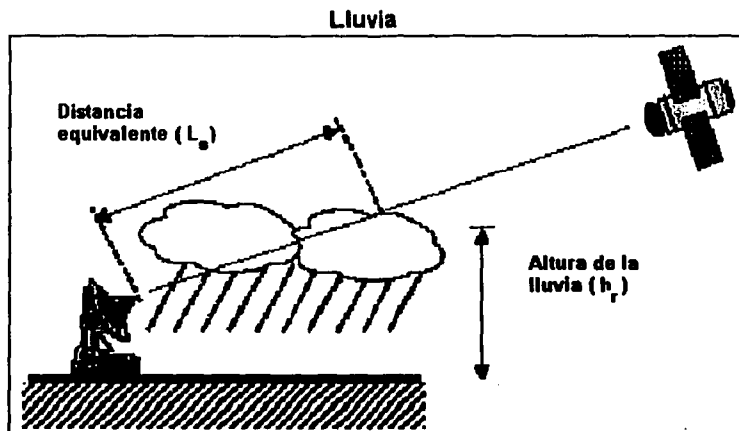
### Gráfica de Atenuación contra el ángulo de elevación



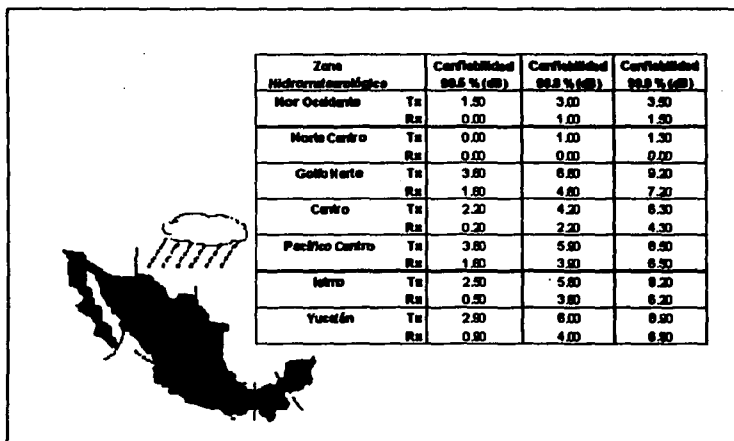
**Atenuación por lluvia.**- Esta depende de la frecuencia de enlace y de la intensidad de la lluvia. A frecuencias menores de 10 GHz el efecto será despreciable. Para valorar esta atenuación, se debe calcular un coeficiente de atenuación expresado en (dB/Km) que después se tendrá que multiplicar por una distancia equivalente, la cual depende del ángulo de elevación.

Esta atenuación se tomará como margen en el diseño.

La siguiente imagen ilustra este punto.



La siguiente imagen muestra el margen de atenuación sobre la República Mexicana.



**Atenuación por otros efectos de la atmósfera.-** Podemos considerar a dos tipos de efectos:

*Deslumbramiento troposférico* – este consiste en fluctuaciones en el nivel de la señal recibida. Es mayor con las frecuencias altas, ángulos de elevación pequeños y antenas con ganancias pequeñas. Es más grande en el verano que en el invierno y en regiones tropicales. Por ejemplo, con un ángulo de elevación ( $\theta$ ) de 10 grados, a una frecuencia de 20 GHz y en lugares templados la variación puede ser de  $\pm 1$  dB en promedio.

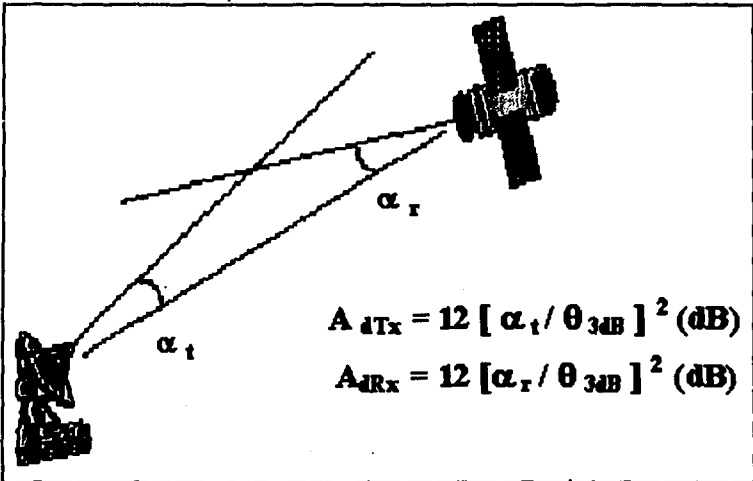
*Efecto de la atmósfera sobre la polarización* – En él hay rotación del plano de polarización debido a que la ionósfera es un plasma bajo un campo magnético en donde las componentes del campo eléctrico no viajan a la misma velocidad. Esto obliga a las frecuencias alrededor de 1 GHz a usar polarización circular. En frecuencias entre 2 y 3 GHz se puede usar polarización lineal. En frecuencias mayores de 10 GHz este efecto se desprecia. Debido a este efecto hay generación de energía en una polarización ortogonal a la original, esto debido a la atmósfera no ionizada. Se le conoce como depolarización.

**Atenuación por desalineamiento de antenas.-** Este es mínimo en los satélites geoestacionarios. Existe el desalineamiento mecánico además de las pérdidas por desacoplamiento en la polarización.

Normalmente se considera un máximo de 3 dB para estas pérdidas.

La siguiente imagen ilustra este punto.

### Desalineamiento de Antenas

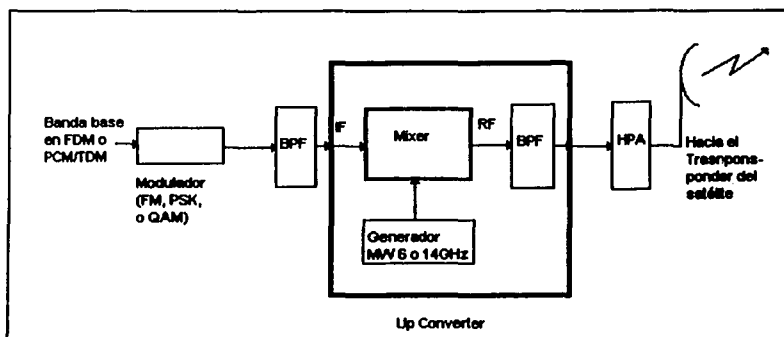


## 2.4 CONSIDERACIONES DE TRANSMISION Y RECEPCION

Esencialmente, un sistema de satélite consta de tres secciones básicas que son: el enlace de subida (uplink), el repetidor (transponder) del satélite y el enlace de bajada (downlink). Son estas tres secciones las que formaran los modelos de enlace de un sistema de satélite.

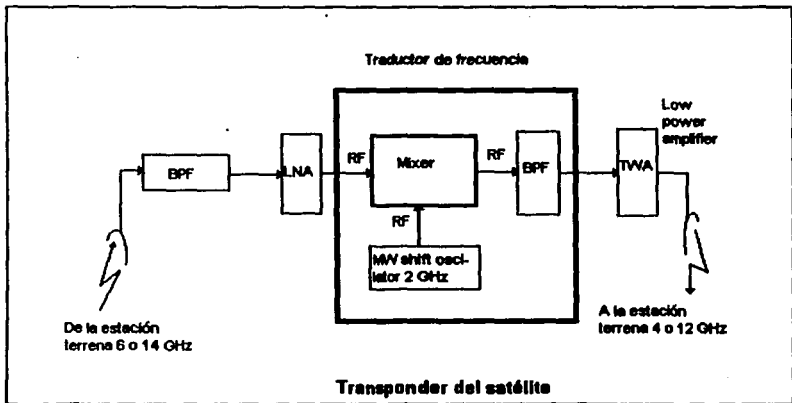
### Modelo de enlace de subida (Uplink Model)

El componente primario dentro de la sección de enlace de subida (uplink) de un sistema de satélite es el transmisor de la estación de tierra. Un transmisor de tierra típico consiste de un modulador de IF, un convertidor de microondas de IF-RF, un amplificador de alta-potencia (HPA) y algunos medios de limitación de banda del espectro de salida (i.e., un filtro pasa banda de salida). El modulador-demodulador de IF convierte la señal de entrada de banda base a cualquiera de las frecuencias moduladas intermedias como FM, PSK O QAM. El convertidor de subida (mezclador y filtro pasa banda) convierte a la IF en una portadora de frecuencia apropiada RF. El amplificador de alta potencia (HPA) proporciona adecuadamente la sensibilidad de entrada y la potencia de salida para propagar la señal al repetidor (transponder) del satélite. Los amplificadores de alta potencia (HPAs) comúnmente usados son los klystrons y los tubos guía de onda. La siguiente imagen ilustra este punto.



### Transponder (Repetidor)

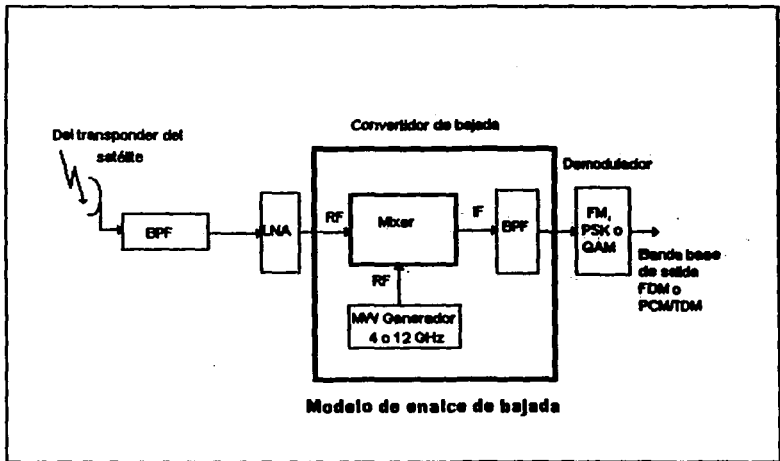
Un Transponder (Repetidor) de satélite típico consiste de un dispositivo limitador de banda (BPF) a la entrada, un amplificador de bajo-ruido (LNA) de entrada, un traductor de frecuencia, un amplificador de potencia de bajo-nivel, y un filtro pasa-banda a la salida. La figura al final del párrafo muestra un diagrama simplificado de un transponder (repetidor) de satélite. Este transponder es un repetidor de RF-RF. Otras configuraciones del transponder son de repetidores de IF y de banda-base similar a aquéllos usados en repetidores de microondas. En la figura, el BPF de la entrada limita el ruido total aplicado a la entrada del LNA. (Un dispositivo comúnmente usado como LNA es un túnel de diodos). La salida del LNA alimenta a un traductor de frecuencia (un oscilador de cambio y un BPF) el cual convierte la banda de frecuencia alta del enlace de subida a la banda de frecuencia baja del enlace de bajada. El amplificador de potencia de nivel-bajo que normalmente es un tubo de guía de onda, amplifica a la señal de RF para la transmisión a través del enlace de bajada a los receptores de la estación de tierra. Cada canal de RF de satélite requiere un transponder separado. Lo anterior lo podemos ver en la siguiente imagen.



### Modelo de enlace de bajada (Downlink model)

Un receptor de estación de tierra incluye un BPF de entrada, un LNA, y un convertidor de RF-IF de bajada. La figura al final del párrafo muestra un diagrama de bloques de un receptor de estación de Tierra típico. De nuevo, el BPF limita la potencia del ruido de entrada al LNA. El LNA es un dispositivo altamente sensible de bajo ruido, como el amplificador de túnel de diodos o el amplificador paramétrico. El convertidor de bajada de RF-IF es una combinación de mezclador/ filtro pasa-banda que convierte la señal de RF recibida a una frecuencia IF.

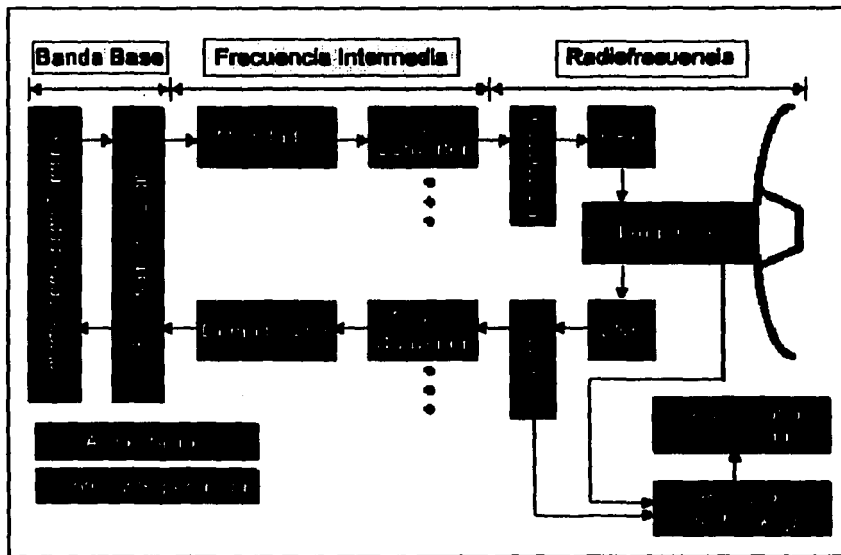
Lo anterior lo podemos observar en la siguiente figura.





A continuación presentamos un esquema del equipo terrestre donde podemos ver tanto el modelo de enlace de subida como el de bajada.

## Equipo Terrestre



## 2.5 PARAMETROS DEL SISTEMA

### Potencia de Transmisión

Para operar tan eficiente como sea posible, un amplificador de potencia debe operarse tan cerca como sea posible de la saturación. La potencia de salida saturada es designada como  $P_0$  (sat) o simplemente  $P_t$ . La potencia de salida típica de un transmisor de una estación de tierra de un satélite es mucho mayor que la potencia de salida de un amplificador de potencia de microondas terrestre. Por consiguiente, al tratar con sistemas de satélite,  $P_t$  generalmente se expresa en DbW (decibeles con respecto a 1 W) en lugar de Dbm (decibeles con respecto a 1mW).

### Energía de Bit

Los más modernos sistemas de satélite usan la MODULACIÓN POR CAMBIO DE FASE (PHASE SHIFT KEYING PSK) o LA MODULACION POR AMPLITUD DE CUADRATURA (QUADRATURE AMPLITUDE MODULATIN QAM) en lugar de la modulación de frecuencia convencional (FM). Con PSK y QAM, la banda-base de entrada esta generalmente codificada en-PCM, en una señal *multiplexada-por-división de tiempo* la cual es de naturaleza digital. Además, con PSK y QAM, varios bits pueden ser codificados en un simple elemento de señal de transmisión (baudio). Por consiguiente, un parámetro más significativo que la potencia de la portadora es la energía por bit ( $E_b$ ). matemáticamente,  $E_b$  es

$$E_b = P_t T_b \quad (2.5-1a)$$

donde

$E_b$  = Energía de un solo bit (J/bit)

$P_t$  = Potencia total de la portadora (W)

$T_b$  = Tiempo de un solo bit (s)

o porque  $T_b = 1/F_b$ , Donde  $F_b$  es la velocidad de bits, en bits por segundos.

$$E_b = P_t / F_b \quad (2.5-1b)$$

### Antena Isotrópica

Una antena isotrópica es una antena ideal sin pérdidas, la cual radia la misma potencia en cualquier dirección. En la práctica, solo se puede acercar a lo que es una antena isotrópica, sin llegar a ser como ella. De cualquier forma, para estudios de sistemas de satélites es conveniente usar a la antena isotrópica como una referencia para la comparación con las antenas actuales. Una antena que radia la misma potencia en todas direcciones (i.e. antena isotrópica) tiene una ganancia = 1. Para esta antena donde la radiación es constante en todas direcciones esta dada por:

$$\text{Intensidad de radiación de una antena isotrópica} = P / 4 \pi \quad (2.5-2)$$

Donde P es la potencia de entrada.

### Ganancia de la Antena

El relativo incremento en la potencia alcanzada por el foco de la antena es definido como la ganancia de la antena, G. Esta ganancia puede ser definida como:

$$G = \text{máxima intensidad de radiación} / \text{intensidad de radiación de una antena isotrópica} \quad (2.5-3 \text{ a})$$

Asumiendo la misma potencia de entrada. Podemos definir esta ganancia como:

$$G = \frac{\text{Potencia que el receptor recibe de la antena}}{\text{Potencia que el receptor debería recibir si la transmisión fuera isotrópica}} \quad (2.5-3 \text{ b})$$

Usando las ecuaciones (2.5 -2) y (2.5 -3 a), obtenemos

$$G = \frac{4 \pi (\text{máxima intensidad de radiación})}{P} \quad (2.5 - 4)$$

Una útil, aunque no tan exacta expresión para la antena parabólica es:

$$G = \eta (\pi d / \lambda)^2 = \eta (\pi f^2 A_1 / c^2) \quad (2.5 - 5)$$

Donde:

$\eta$  = Eficiencia de la antena (valor típico de 0.55)

$d$  = Diámetro de la antena

$\lambda$  = Ancho de onda

$c = 2.99 \times 10^8$  m/s (velocidad de la luz)

$f = c / \lambda$  (frecuencia de la portadora)

$A_1 = d^2 \pi / 4$  = Área de apertura de la antena de transmisión

Si la frecuencia está dada en gigahertz y el diámetro de la antena en metros, entonces para una eficiencia de la antena de  $\eta = 0.55$ :

$$G = 60.7 f^2 d^2 \quad (2.5 - 6)$$

### Potencia Isotrópica Radiada Efectiva PIRE

La Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE) es definida como un equivalente de transmisión de potencia y se expresa matemáticamente como

$$PIRE = P_r A_1$$

donde

PIRE = Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (W)

$P_r$  = Potencia total radiada de la antena (W)

$A_1$  = Ganancia de transmisión de la antena (W / W o proporción sin unidades)

Expresado como log,

$$PIRE (DbW) = P_r (DbW) + A_1 (Db)$$

Con respecto al rendimiento del transmisor,

$$P_r = P_t - L_{bo} - L_{bf}$$

así

$$PIRE = P_t - L_{bo} - L_{bf} + A_t \quad (2.5 - 7)$$

donde

$P_t$  = Potencia actual de salida del transmisor (DbW)

$L_{bo}$  = Pérdidas de back-off del HPA (Db)

$L_{bf}$  = Pérdida total por sección y del alimentador (Db)

$A_t$  = Ganancia de la transmisión de la antena (Db)

### Perdidas de Espacio Libre (FSL)

La pérdida de potencia de una onda de radio en el espacio libre es:

$$L_{fs} = (4 \pi R / \lambda)^2 = (4 \pi f R / c)^2 \quad (2.5 - 8 a)$$

Donde:

$f$  = Frecuencia de la onda de radio

$\lambda$  = Longitud de onda ( $\lambda = c / f$ )

$R$  = Distancia recorrida en el espacio; para un ángulo de elevación de 90° esta distancia es  $3.593 \times 10^7 \text{ m} \approx 3.6 \times 10^4 \text{ Km}$

$c$  = Velocidad de la luz ( $c = 2.99 \times 10^8 \text{ m / s}$ )

La propagación de la "pérdida del espacio libre" se puede interpretar también como:

$$L_{fs} = \frac{\text{Potencia recibida por una antena isotrópica}}{\text{Potencia transmitida por una antena isotrópica}} \quad (2.5 - 8 b)$$

La ecuación (2.5 - 8 a), para un ángulo de elevación de 90°, expresada en decibeles, es

$$L_{fs}(\text{dB}) = 183.5 + 20 \log f \quad (2.5 - 9)$$

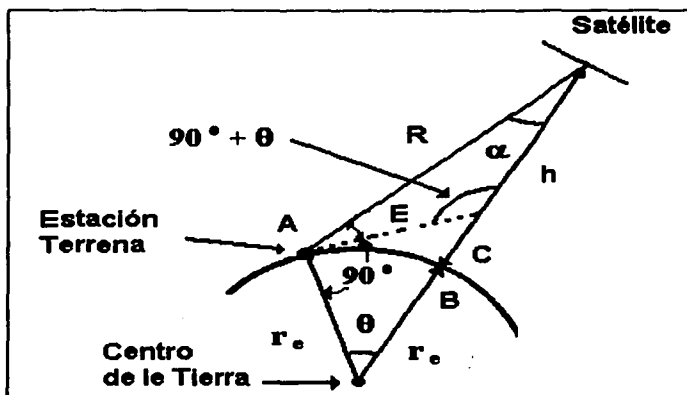
Donde  $f$  esta en gigahertz.

La distancia, también conocida como *rango de inclinación*, de una estación terrena hacia el satélite

es:

$$R = [(h + r_e)^2 + r_s^2 - 2 r_e (h + r_e) \cos \theta]^{1/2} \quad (2.5 - 10)$$

Donde  $h$ ,  $r_e$  y  $\theta$  están definidos en la siguiente figura.



Rango de inclinación, ángulo central, ángulo de elevación y ángulo nadir (órbita geoestacionaria).

$r_e$ , radio de la Tierra: 3,444 nm (6,378 km);  $h$ , altura del satélite: 19,400 nm (35,930 km);

$r_e + h = 22,800$  nm (42,230 km);  $R$ , rango de inclinación;  $E$ , ángulo de elevación;  $\theta$ , ángulo central;

$\alpha$ , ángulo nadir.

### TEMPERATURA EQUIVALENTE DEL RUIDO Y FIGURA DE RUIDO (NF)

Con sistemas de microondas terrestres, el ruido introducido en un receptor o en un componente dentro de un receptor, normalmente es especificado por el parámetro de la figura de ruido. En sistemas de comunicaciones de satélite, es a menudo necesario diferenciar o medir el ruido en incrementos tan pequeño como décimas o centésimas de un decibel. La figura del ruido, en su forma normal es inadecuada para cálculos precisos. Por consiguiente, es común usar la temperatura del medio ambiente ( $T$ ) y la temperatura equivalente del ruido ( $T_e$ ) cuando evaluamos el desempeño de un sistema de satélite. La potencia total del ruido se expresa

matemáticamente como:

$$N = K T B \quad (2.5 - 11)$$

reestructurando y resolviendo para una T dada

$$T = N / K B \quad (2.5 - 12)$$

donde

N = Potencia total del ruido (W)

K = Constante de Boltzmann (J / K) =  $1.380 \times 10^{-23}$  Ws / K  
= - 198.6 dBm /k /Hz

B = Ancho de banda (Hz)

T = Temperatura ambiental (K)

De la expresión de matemática de la Figura de Ruido (NF)

$$NF = 1 + (T_e / T) \quad (2.5 - 13)$$

donde

$T_e$  = Temperatura equivalente del ruido (K)

NF = Figura de ruido (valor absoluto)

T = Temperatura ambiental (k)

Y reestructurando la ecuación, tenemos

$$T_e = T (NF - 1) \quad (2.5 - 14)$$

típicamente, las temperaturas equivalentes del ruido de los receptores usados en los transponders de los satélites son de aproximadamente 1000 K. Para los receptores de una estación de tierra los valores de  $T_e$  están entre 20 y 1000 K. La temperatura equivalente del ruido es generalmente más útil cuando se expresa logarítmicamente con la unidad de DbK, como sigue:

$$T_e \text{ (dBK)} = 10 \log T_e \quad (2.5 - 15)$$

para la temperatura equivalente del ruido de 100 K,  $T_e$  (dBK) es

$$T_e \text{ (dBK)} = 10 \log 100 \text{ o } 20 \text{ dBK}$$

La temperatura equivalente del ruido es un valor hipotético que puede calcularse pero no puede medirse. La temperatura equivalente del ruido se usa a menudo en lugar de la figura del ruido porque es un método más exacto para expresar el ruido contribuido por un dispositivo o un

receptor al evaluar su desempeño. Esencialmente, la temperatura equivalente del ruido ( $T_e$ ) es el ruido presente a la entrada de un dispositivo o amplificador además del ruido agregado internamente por el dispositivo. Esto nos permite analizar las características del ruido de un dispositivo por la simple evaluación de la temperatura equivalente del ruido de la entrada. Esto lo veremos en discusiones subsecuentes,  $T_e$  es un parámetro muy útil al evaluar el desempeño de un sistema de satélite.

### DENSIDAD DEL RUIDO

Simplemente declarado, densidad del ruido ( $N_o$ ) es la potencia normalizada total del ruido a un ancho de banda de 1-Hz, o la potencia del ruido presente en un ancho de banda de 1-hz.

Matemáticamente, la densidad del ruido es

$$N_o = N / B \quad \text{ó} \quad N_o = K T_e \quad (2.5 - 16a)$$

Donde

$N_o$  = Densidad de ruido (W / Hz) ( $N_o$  generalmente se expresa como simplemente Watts; el por Hz esta implícito en la definición de  $N_o$ )

$N$  = Potencia total del ruido (W)

$B$  = Ancho de banda (Hz)

$K$  = La constante de boltzmann (J / K) =  $1.380 \times 10^{-23}$  Ws / K  
= - 198.6 dBm /k /Hz

$T_e$  = Temperatura equivalente del ruido (K)

expresado como log,

$$N_o \text{ (dB W / Hz)} = 10 \log N - 10 \log B \quad (2.5 - 16b)$$

$$= 10 \log K + 10 \log T_e \quad (2.5 - 16c)$$



## PARAMETROS USADOS FRECUENTEMENTE

### RELACION DE PORTADORA A DENSIDAD DE RUIDO

$C / N_0$  es la relación del promedio de la potencia del ancho de banda de la portadora - a - la densidad de ruido. La potencia del ancho de banda de la portadora es la potencia combinada de la portadora y sus bandas aledañas asociadas. El ruido es un ruido térmico presente en un ancho de banda normalizado a 1-Hz. La relación de portadora - a - densidad de ruido también puede escribirse como una función de la temperatura del ruido. Matemáticamente,  $C / N_0$  es:

$$C / N_0 = C / K T_0 \quad (2.5 - 17a)$$

expresado como log,

$$C / N_0 \text{ (dB)} = C \text{ (dBW)} - N_0 \text{ (dBW)} \quad (2.5 - 17b)$$

### RELACION DE LA GANANCIA DE LA FIGURA DE MERITO - A - TEMPERATURA EQUIVALENTE DE RUIDO [G / T<sub>e</sub>]

La eficiencia de un satélite y de las secciones receptoras de una estación terrena es especificada frecuentemente en términos de la relación de ganancia - a - temperatura equivalente de ruido:

$$\text{Figura de mérito} = G / T_0 \quad (\text{dB} / \text{K} \text{ ó } \text{dBK}^{-1}) \quad (2.5 - 18)$$

### ENERGIA DE BIT $E_b$

La energía del bit  $E_b$ , se obtiene al multiplicar la potencia de la portadora  $C$ , por la duración del bit; esto es:

$$E_b = C T_b \quad (2.5 - 19)$$

## RELACION DE ENERGIA DE BIT - A - DENSIDAD DE RUIDO

$E_b / N_0$  es uno de los parámetros más importantes y usados al evaluar un sistema de radio digital.

La relación  $E_b / N_0$  es una forma conveniente de comparar los sistemas digitales que usan diferentes velocidades de transmisión, esquemas de modulación, o técnicas de codificación.

Matemáticamente,  $E_b / N_0$  es:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C / F_b}{N / B} = \frac{CB}{N F_b} \quad (2.5 - 20 a)$$

$E_b / N_0$  es un término usado convenientemente para cálculos de los sistemas digitales y comparaciones del desempeño, pero en el mundo real, es más conveniente medir la relación de la potencia del ancho de banda de la portadora -  $s$  - la densidad de ruido y convertirla a  $E_b / N_0$ .

Reestructurando la ecuación (2.5 - 20 a) obtenemos la expresión siguiente:

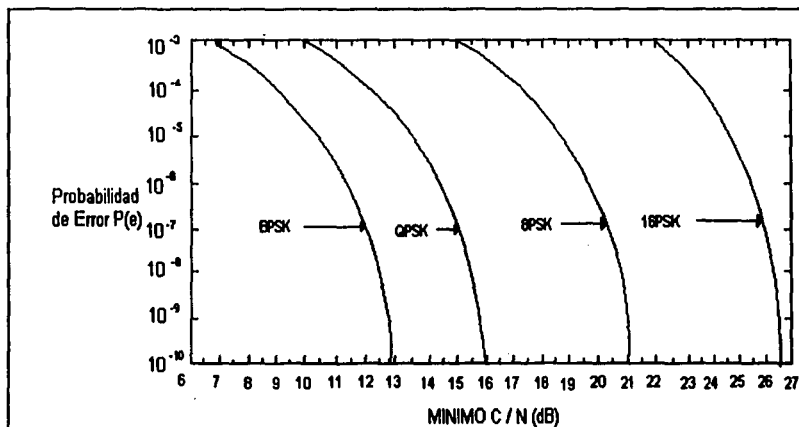
$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} \times \frac{B}{F_b} \quad (2.5 - 20 b)$$

La razón  $E_b / N_0$  es el producto de la razón *portadora-s-ruido* ( $C / N$ ) y la razón *del ruido del ancho de banda-a-bit* ( $B / F_b$ ). Expresado como log,

$$E_b / N_0 (\text{dB}) = C / N (\text{dB}) + B / F_b (\text{dB}) \quad (2.5 - 21)$$

La energía por bit ( $E_b$ ) permanece constante tanto como la potencia total del ancho de banda de la portadora y el promedio de (bps) de la transmisión permanezca inalterado. También, la densidad del ruido ( $N_0$ ) permanecerá constante con tal de que la temperatura del ruido permanezca constante. Se puede hacer la siguiente conclusión: Para una potencia de la portadora dada, promedio de bits y la temperatura del ruido, la razón de  $E_b / N_0$  permanecerá constante sin tener en cuenta la técnica de codificación, el esquema de la modulación, o el ancho de banda usado.

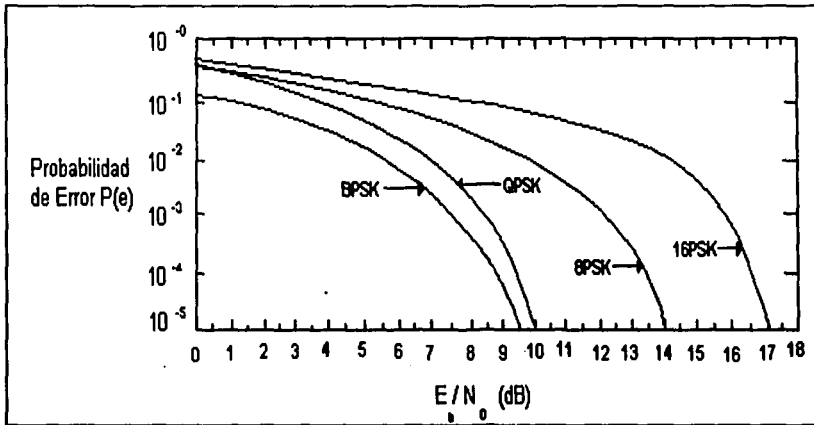
La siguiente figura ilustra gráficamente la relación entre un probable error esperado  $P(e)$  y la proporción de  $C/N$  mínima requerida para alcanzar el  $P(e)$ . El  $C/N$  especificado es para el mínimo del ancho de banda Nyquist de doble-lado.



**Probabilidad de Error  $P(e)$  contra  $C/N$  para varios esquemas de modulación digital.**

**(El ancho de banda es igual al ancho de banda de doble-lado de Nyquist)**

La siguiente figura ilustra gráficamente la relación entre un  $P(e)$  esperado y la razón mínima de  $E_b / N_0$  requerida para lograr ese  $P(e)$ .



**Probabilidad de Error  $P(e)$  contra la razón  $E_b / N_0$  para varios esquemas de modulación digital.**

Un  $P(e)$  de  $10^{-5}$  ( $1/10^5$ ) indica una probabilidad de que haya 1bit de error cada 100,000 bits transmitidos.  $P(e)$  es análogo al bit de error promedio (ber).

Porque  $E_b / N_0$  no puede medirse directamente para determinar la proporción de  $E_b / N_0$  la razón del ancho de banda de la portadora-a-ruido es calculada y luego sustituida en la ecuación (2.5 – 21). Por consiguiente, determinar la razón de  $E_b / N_0$  con precisión, se debe conocer el ruido del ancho de banda del receptor.

Cuando el esquema de modulación, la velocidad de bits, el ancho de banda y las razones de  $C / N$  de dos sistemas de radio digitales son diferentes; es a menudo difícil determinar qué sistema tiene

la probabilidad más baja de error. Porque  $E_b / N_0$  es independiente de la velocidad de bits, del ancho de banda, y del esquema de modulación; es un común denominador conveniente para comparar la probabilidad del desempeño de error de dos sistemas de radio digitales.

### Razón de Ganancia-a-Temperatura Equivalente de Ruido ( $G / T_e$ )

Esencialmente, la razón de ganancia-a-temperatura equivalente de ruido ( $G / T_e$ ) es una figura de mérito usada para representar la calidad de un receptor de un satélite o de una estación de tierra. El  $G / T_e$  de un receptor es la razón de la ganancia recibida de la antena a la temperatura equivalente del ruido ( $T_e$ ) del receptor. Debido a la sumamente pequeña potencia recibida de la portadora típicamente experimentada con sistemas de satélites, muy a menudo un LNA se localiza físicamente en el punto de sustento de la antena. Cuando éste es el caso,  $G / T_e$  es la razón de ganancia de la antena receptora a la temperatura equivalente del ruido. Matemáticamente, la razón de ganancia-a-temperatura equivalente de ruido es

$$G / T_e = A_r / T_e \quad (2.5 - 22)$$

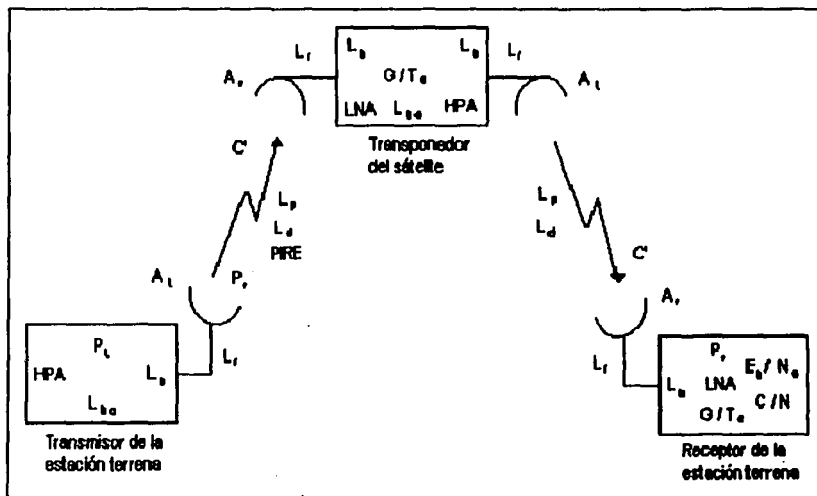
expresado en log, tenemos

$$G / T_e \text{ (dBK}^{-1}\text{)} = A_r \text{ (dB)} - T_e \text{ (dBK-1)} \quad (2.5 - 23)$$

$G / T_e$  es un parámetro muy útil para determinar las relaciones de  $E_b / N_0$  y de  $C / N$  al transponedor del satélite y los receptores de la estación de tierra.  $G / T_e$  es esencialmente el único parámetro requerido en los receptores del satélite o de la estación de tierra al completar un proyecto de enlace.

## 2.6 ECUACIONES DE ENLACE DE UN SISTEMA DE SATELITE

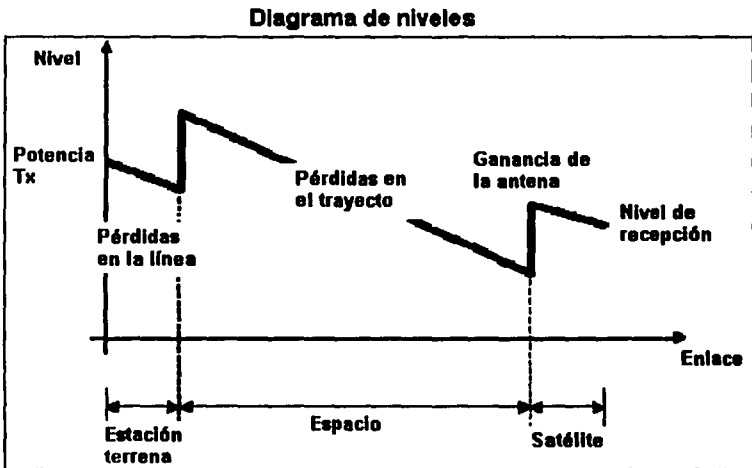
El desempeño de error de un sistema de satélite digital es bastante predecible. La siguiente figura muestra un diagrama de bloques simplificado de un sistema de satélite digital e identifica las ganancias y pérdidas que pueden afectar el desempeño del sistema.



Sistema de satélite global que muestra las ganancias y pérdidas que ocurren tanto en las secciones de subida como las secciones de bajada. HPA, Amplificador de Alta Potencia;  $P_t$ , Potencia de salida del HPA;  $L_{bo}$ , Pérdida de back-off;  $L_f$ , pérdidas de alimentación;  $L_b$ , pérdidas por bifurcación;  $A_t$ , ganancia de la antena de transmisión;  $P_r$ , potencia radiada total =  $P_t - L_{bo} - L_b - L_f$ ; PIRE, Potencia isotrópica radiada efectiva =  $P_e$ ;  $L_a$ , pérdidas de subida adicionales debido a la atmósfera;  $L_p$ , pérdidas de trayectoria;  $A_r$ , ganancia de la antena receptora;  $G/T_e$ , relación de ganancia-a-equivalente de ruido;  $L_d$ , pérdidas de

bajada adicionales debido a la atmósfera; LNA, Amplificador de Bajo Ruido;  $C/T_0$ , relación de portadora -a- equivalente de ruido;  $C/N_0$ , relación de portadora -a- densidad de ruido;  $E_b/N_0$ , relación de energía de bit -a- densidad de ruido;  $C/N$ , relación de portadora -a- ruido.

La siguiente imagen nos presenta lo anterior visto como un diagrama de niveles.



Al evaluar el desempeño de un sistema de satélite digital, se consideran primero separadamente los parámetros del enlace de subida y los del enlace de bajada, entonces el desempeño global se determina combinándolos de la manera apropiada. Tenga presente, una microonda digital de radio de satélite simplifica los medios de las señales originales y la demoduladora de base banda que son digitales por naturaleza. La porción de la RF de radio es analógica; es decir, la FSK, la PSK, la QAM, o alguna otra modulación de alto nivel montada en una señal portadora de microondas analógica.

## Ecuaciones de Enlace

Las siguientes ecuaciones de enlace se usan para analizar de manera separada los enlaces de subida y las secciones del enlace de bajada de una sola portadora de radio-frecuencia del sistema de satélite. Estas ecuaciones consideraran sólo las ganancias y pérdidas ideales y los efectos del ruido térmico asociado con el transmisor y el receptor de la estación de tierra y el transpondedor del satélite. Los aspectos no ideales del sistema se discuten después en este capítulo.

### Ecuación de Enlace de subida (Uplink)

$$\frac{C}{N_0} = \frac{A_t P_r (L_p L_u) A_r}{K T_e} = \frac{A_t P_r (L_p L_u) X G}{K T_e}$$

Donde  $L_d$  y  $L_u$  son las pérdidas atmosféricas adicionales de enlace de subida y enlace de bajada, respectivamente. Las señales de enlace de subida y de enlace de bajada deben atravesar la atmósfera de la tierra, donde ellas son parcialmente absorbidas por la humedad, el oxígeno, y las partículas en el aire. Dependiendo del ángulo de elevación, la distancia que viaja la señal de RF a través de la atmósfera varía de una estación de tierra a otra. Porque  $L_d$  y  $L_u$  representan pérdidas, son valores decimales menores que 1.  $G/T_e$  es la ganancia de la antena receptora dividida por la temperatura equivalente de ruido de entrada.

Expresado como log:

$$\begin{aligned} C/N_0 &= 10 \log A_t P_r - 20 \log (4\pi D / \lambda) + 10 \log (G/T_e) - 10 \log L_u - 10 \log K \\ &= \text{PIRE de la} - \text{Pérdidas del} + G/T_e \text{ del} - \text{Pérdidas} - \text{La constante} \\ &\quad \text{estación de} \quad \text{espacio libre} \quad \text{satélite} \quad \text{adicionales} \quad \text{de Boltzmann} \\ &\quad \text{tierra} \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \text{atmosféricas} \\ &= \text{PIRE (dBW)} - L_p \text{ (dB)} + G/T_e \text{ (dBK}^{-1}\text{)} - L_u \text{ (dB)} - K \text{ (dBWK)} \end{aligned}$$



### Ecuación de Enlace De Bajada (downlink)

$$\frac{C}{N_0} = \frac{A_t P_r (L_p L_d) A_r}{K T_e} = \frac{A_t P_r (L_p L_d) X G}{K T_e}$$

Expresado como log :

$$C / N_0 = 10 \log A_t P_r - 20 \log (4\pi D / \lambda) + 10 \log (G / T_e) - 10 \log L_d - 10 \log K$$

= PIRE del satélite - Pérdidas del espacio libre + G / T<sub>e</sub> de la estación de tierra - Pérdidas adicionales atmosféricas - La constante de Boltzmann

$$= \text{PIRE (dBW)} - L_p (\text{dB}) + G / T_e (\text{dBK}^{-1}) - L_d (\text{dB}) - K (\text{dBWK})$$

## 2.7 EVALUACION DEL ENLACE

Los parámetros de los sistemas se usan para construir o evaluar un enlace. Una evaluación del enlace identifica los parámetros del sistema y los usa para determinar las relaciones de  $C/N$  y de  $E_b/N_0$  proyectadas en los receptores del satélite y la estación de tierra para un esquema de modulación deseado  $P(e)$ .

Con un análisis cuidadoso y un poco de álgebra, puede mostrarse que la energía global de la razón de densidad de bit-a-ruido ( $E_b/N_0$ ) que incluye los efectos combinados de la razón de  $(E_b/N_0)_u$  del enlace de subida y la razón de  $(E_b/N_0)_d$  del enlace de bajada, es el producto normal sobre la relación de la suma y se expresa matemáticamente como

$$\frac{E_b \text{ (global)}}{N_0} = \frac{(E_b/N_0)_u (E_b/N_0)_d}{(E_b/N_0)_u + (E_b/N_0)_d} \quad (2.7 - 1)$$

Donde todas las relaciones de  $E_b/N_0$  están en valores absolutos.

Así con todos los productos sobre las relaciones de las sumas, domina el más pequeño de los dos números. Si un número es substancialmente más pequeño que el otro, el resultado global es aproximadamente igual al más pequeño de los dos números.

## 2.8 PARÁMETROS DEL SISTEMA NO IDEALES

Los parámetros no ideales adicionales incluyen los deterioros siguientes:

- Conversión de AM/FM y la conversión de AM/PM, que es el resultado de la amplificación no-lineal en los HPA y en los limitadores.
- El punto de error, que ocurre cuando no se alinean exactamente las antenas de la estación de tierra y del satélite.
- La fluctuación de la fase, que es el resultado de la recuperación imperfecta de la portadora en los receptores.
- Del filtrado no-ideal, debido a las imperfecciones introducidas en los filtros pasa-banda.
- Al error de tiempo (cronometrando), debido a la recuperación imperfecta del reloj en los receptores.
- Los errores de traducción de frecuencia introducidos en los transponders del satélite.

La degradación causada por los anteriores deterioros, efectivamente reduce la relación  $E_b / N_0$  determinada en los cálculos de la evaluación del enlace. Por consiguiente, ellos tienen que ser incluidos en la evaluación del enlace como pérdidas equivalentes.

Una cobertura más profunda de los parámetros no ideales va más allá del intento de este texto.

## 2.9 RESUMEN DEL CALCULO DE ENLACE

El siguiente cuadro muestra a grandes rasgos los pasos que intervienen en un cálculo de enlace satelital.

<p><b>Cálculo de la Geometría del Enlace:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevación</li> <li>• Azimuth (corrección)</li> <li>• Distancia</li> </ul>
<p><b>Cálculo de las Pérdidas en el Trayecto:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• FSL ( Pérdidas en el espacio libre )</li> <li>• Atenuación por lluvia</li> <li>• Otras Pérdidas</li> </ul>
<p><b>Obtención del Factor de Mérito:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Teoría del Ruido</li> <li>• G/T para la estación terrena y del satélite</li> </ul>
<p><b>Cálculo de <math>C/N_0</math> y <math>C/N</math>:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ascendente</li> <li>• Descendente</li> </ul>
<p><b>Evaluación del Enlace</b></p>

## 2.10 EJEMPLOS

La siguiente tabla lista los parámetros del sistema para tres sistemas de comunicación de satélite típicos. Los sistemas y sus parámetros no son necesariamente para sistemas existentes o de un futuro; sólo son ejemplos hipotéticos. Como hemos visto los parámetros de los sistemas son usados para construir un proyecto de enlace. En dicho proyecto de enlace identificaremos los parámetros del sistema y los usaremos para determinar las relaciones de  $C/N$  y de  $E_b/N_0$  proyectadas en los receptores del satélite y la estación de tierra para un esquema de modulación deseado  $P(e)$ .

### SISTEMA DE PARAMETROS PARA TRES SISTEMAS DE SATÉLITES HIPOTÉTICOS.

	Sistema A: 6/4 GHz de cobertura terrestre. Modulación QPSK de 60 Mbps.	Sistema B: 14/12 GHz de cobertura terrestre. Modulación 8PSK de 90 Mbps.	Sistema C: 14/12 GHz de cobertura terrestre. Modulación 8PSK de 120Mbps.
<b>Enlace de Subida (Uplink)</b>			
Potencia de salida del transmisor (saturación, dBW)	35	25	33
Pérdida de back-off de la estación terrena (dB)	2	2	3
Pérdidas de alimentación y bifurcación de la E. T. (dB)	3	3	4
Pérdidas atmosféricas adicionales (dB)	0,8	0,4	0,8
Ganancia de la antena de la E. A. (dB)	55	45	64
Pérdidas de espacio libre (dB)	200	208	206,5
Ganancia de la antena receptora del satélite (dB)	20	45	23,7
Pérdidas de alimentación y bifurcación del satélite (dB)	1	1	0
Temperatura equivalente del ruido del satélite (K)	1000	800	800
$G/T_e$ (dBK <sup>-1</sup> ) del satélite	-10	16	-5,3
<b>Enlace de Bajada (Downlink)</b>			
Potencia de salida del transmisor (saturación, dBW)	18	20	30,8
Pérdida de back-off del satélite (dB)	0,5	0,2	0,1
Pérdidas de alimentación y bifurcación del satélite (dB)	1	1	0,5
Pérdidas atmosféricas adicionales (dB)	0,8	1,4	0,4
Ganancia de la antena del satélite (dB)	16	44	10
Pérdidas de espacio libre (dB)	197	206	205,6
Ganancia de la antena receptora de la E. T. (dB)	51	44	62
Pérdidas de alimentación y bifurcación de la E. T. (dB)	3	3	0
Temperatura equivalente del ruido de la E. T. (K)	250	1000	270
$G/T_e$ (dBK <sup>-1</sup> ) de la Estación Terrena	27	14	37,7

**EJEMPLO:**

Complete la evaluación del enlace para un sistema de satélite con los siguientes parámetros.

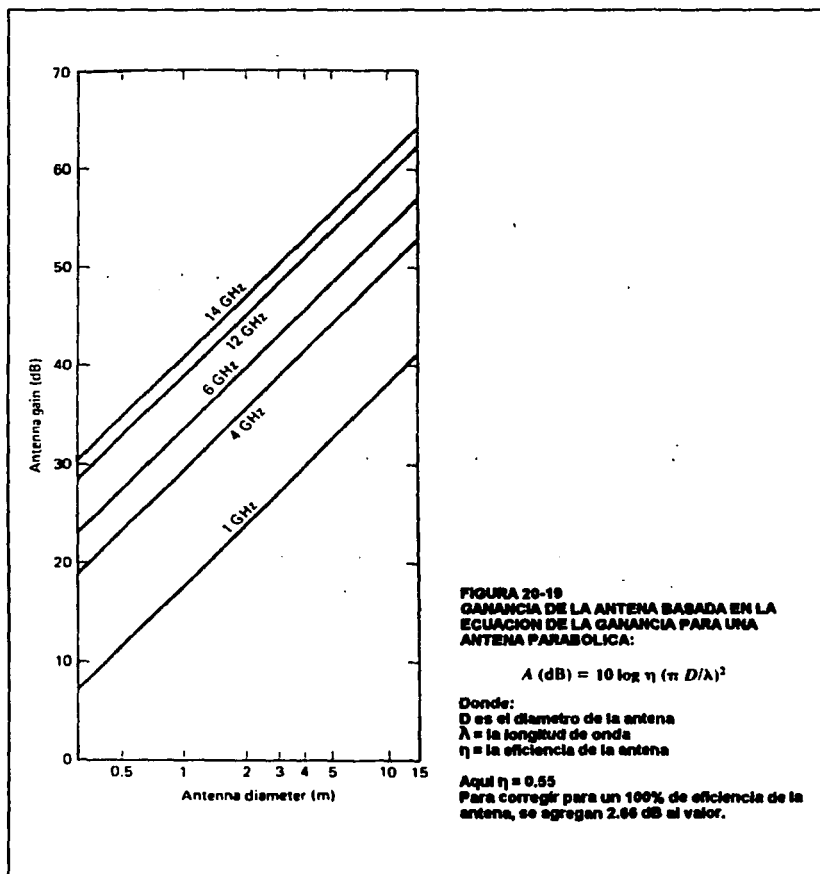
**ENLACE DE SUBIDA (UPLINK)**

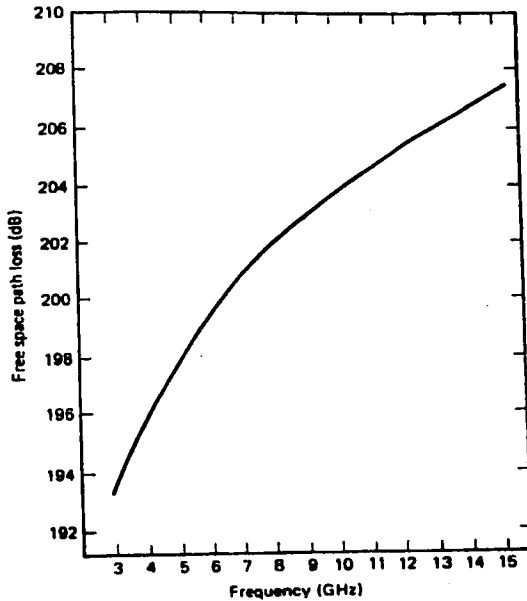
1.- Potencia de salida en saturación del transmisor de la estación de tierra, 2000 W	33 dBW
2.- Pérdidas de back-off de la estación terrena	3 dB
3.- Pérdidas de alimentación y bifurcación de la estación terrena	4 dB
4.- Ganancia de la antena transmisora de la estación terrena (de la figura 20-19, 15m a 14 GHz)	64 dB
5.- Pérdidas atmosféricas adicionales del enlace de subida	0,6 dB
6.- Pérdidas del espacio libre (de la figura 20-20, a 14 GHz)	206,5 dB
7.- Relación G/T <sub>e</sub> del receptor del satélite	-5,3 dBK <sup>-1</sup>
8.- Pérdidas de alimentación y bifurcación del satélite	0 dB
9.- Velocidad de Bit	120 Mbps
10.- Esquema de modulación	8 PSK

**ENLACE DE BAJADA (DOWNLINK)**

1.- Potencia de salida en saturación del transmisor del satélite, 10 W	10 dBW
2.- Pérdidas de back-off del satélite	0,1 dB
3.- Pérdidas de alimentación y bifurcación del satélite	0,5 dB
4.- Ganancia de la antena transmisora del satélite (de la figura 20-19, 0,37m a 12 GHz)	30,8 dB
5.- Pérdidas atmosféricas adicionales del enlace de bajada	0,4 dB
6.- Pérdidas del espacio libre (de la figura 20-20, a 12 GHz)	205,6 dB
7.- Ganancia de la antena receptora de la estación de tierra (15m, a 12 GHz)	62 dB
8.- Pérdidas de alimentación y bifurcación de la estación de tierra	0 dB
9.- Temperatura equivalente del ruido de la estación de tierra	270 K
10.- Relación G/T <sub>e</sub> de la estación de tierra	37,7 dBK <sup>-1</sup>
11.- Velocidad de Bit	120 Mbps
12.- Esquema de modulación	8 PSK

A continuación presentamos las figuras de donde obtuvimos algunos datos.





Corrección del ángulo  
de Elevación:

Angulo	+ dB
90°	0
45°	0.44
0°	1.33

**FIGURA 20-20**  
Perdidas por espacio libre ( $L_p$ )  
Determinada por  
 $L_p = 183.5 + 20 \log F$  (GHz)

Angulo de Elevación = 90°  
Distancia = 35,930 Km



**SOLUCION**

La evaluación del enlace de subida (uplink): Expresado en log,

$$\begin{aligned} \text{PIRE (estación de tierra)} &= P_t + A_t - L_{bo} - L_{br} \\ &= 33 \text{ dBW} + 64 \text{ dB} - 3 \text{ dB} - 4 \text{ dB} = 90 \text{ dBW} \end{aligned}$$

La Densidad de Potencia de la Portadora en la antena del satélite:

$$\begin{aligned} C' &= \text{PIRE (estación de tierra)} - L_p - L_u \\ &= 90 \text{ dBW} - 206.5 \text{ dB} - 0.6 \text{ dB} = -117.1 \text{ dBW} \end{aligned}$$

La relación  $C/N_0$  en el satélite:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{C}{KT_s} = \frac{C}{T_s} \times \frac{1}{K} \quad \text{Donde} \quad \frac{C}{T_s} = C' \times \frac{G}{T_s}$$

Así

$$\frac{C}{N_0} = C' \times \frac{G}{T_s} \times \frac{1}{K}$$

Expresado como log

$$\begin{aligned} \frac{C}{N_0} \text{ (dB)} &= C' \text{ (dBW)} + \frac{G}{T_s} \text{ (dBK}^{-1}\text{)} - 10 \log(1.38 \times 10^{-23}) \\ \frac{C}{N_0} &= -117.1 \text{ dBW} + (-5.3 \text{ dBK}^{-1}) - (-228.6 \text{ dBWK}) = 106.2 \text{ dB} \end{aligned}$$

Así

$$\begin{aligned} \frac{E_b}{N_0} \text{ (dB)} &= \frac{C/F_b}{N_0} \text{ (dB)} = \frac{C}{N_0} \text{ (dB)} - 10 \log F_b \\ \frac{E_b}{N_0} &= 106.2 \text{ dB} - 10 (\log 120 \times 10^6) = 25.4 \text{ dB} \end{aligned}$$

Y para un mínimo de ancho de banda del sistema,

$$\frac{C}{N} = \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{B}{F_b} = 25.4 - 10 \log \frac{40 \times 10^6}{120 \times 10^6} = 30.2 \text{ dB}$$

#### Evaluación del enlace de bajada (downlink)

$$\begin{aligned} \text{PIRE (del transponder del satélite)} &= P_t + A_t - L_{bo} - L_{bt} \\ &= 10 \text{ dBW} + 30.8 \text{ dBW} - 0.1 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} \\ &= 40.2 \text{ dBW} \end{aligned}$$

Densidad de potencia de la portadora en la antena de la estación de tierra:

$$\begin{aligned} C' &= \text{PIRE (dBW)} - L_p \text{ (dB)} - L_d \text{ (dB)} \\ &= 40.2 \text{ dBW} - 205.6 \text{ dB} - 0.4 \text{ dB} = -165.8 \text{ dBW} \end{aligned}$$

La relación  $C/N_0$  en el receptor de la estación de tierra:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{C}{KT_s} = \frac{C}{T_s} \times \frac{1}{K} \quad \text{donde} \quad \frac{C}{T_s} = C' \times \frac{G}{T_s}$$

Así

$$\frac{C}{N_0} = C' \times \frac{G}{T_s} \times \frac{1}{K}$$

Expresado como log,

$$\begin{aligned} \frac{C}{N_0} \text{ (dB)} &= C' \text{ (dBW)} + \frac{G}{T_s} \text{ (dBK}^{-1}\text{)} - 10 \log (1.38 \times 10^{-23}) \\ &= -165.8 \text{ dBW} + (37.7 \text{ dBK}^{-1}) - (-228.6 \text{ dBWK}) = 100.5 \text{ dB} \end{aligned}$$

Un método de solución alternativo para la relación  $C/N_0$  es:

$$\begin{aligned} \frac{C}{N_0} \text{ (dB)} &= C' \text{ (dBW)} + A_r \text{ (dB)} - T_s \text{ (dBK}^{-1}\text{)} - K \text{ (dBWK)} \\ &= -165.8 \text{ dBW} + 62 \text{ dB} - 10 \log 270 - (-228.6 \text{ dBWK}) \\ \frac{C}{N_0} &= -165.8 \text{ dBW} + 62 \text{ dB} - 24.3 \text{ dBK}^{-1} + 228.6 \text{ dBWK} = 100.5 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{E_b}{N_0} \text{ (dB)} &= \frac{C}{N_0} \text{ (dB)} - 10 \log F_b \\ &= 100.5 \text{ dB} - 10 \log (120 \times 10^6) \\ &= 100.5 \text{ dB} - 80.8 \text{ dB} = 19.7 \text{ dB}\end{aligned}$$

y para el mínimo ancho de banda del sistema,

$$\frac{C}{N} = \frac{E_b}{N_0} - \frac{B}{F_b} = 19.7 - 10 \log \frac{40 \times 10^6}{120 \times 10^6} = 24.5 \text{ dB}$$

Con un análisis cuidadoso y un poco de álgebra, puede mostrarse que la energía global de la relación de densidad de bit-a-ruido ( $E_b / N_0$ ) que incluye los efectos combinados de la relación de  $(E_b / N_0)_u$  del enlace de subida y la relación de  $(E_b / N_0)_d$  del enlace de bajada, es el producto normal sobre la relación de la suma y se expresa matemáticamente como

$$\frac{E_b}{N_0} \text{ (global)} = \frac{(E_b / N_0)_u (E_b / N_0)_d}{(E_b / N_0)_u + (E_b / N_0)_d} \quad (2.7 - 1)$$

Donde todas las relaciones de  $E_b / N_0$  están en valores absolutos. Para el ejemplo la relación  $E_b / N_0$  global es:

$$\begin{aligned}\frac{E_b}{N_0} \text{ (global)} &= \frac{(346.7) (93.3)}{(346.7) + (93.3)} = 73.5 \\ &= 10 \log 73.5 = 18.7 \text{ dB}\end{aligned}$$

Así con todos los productos sobre las relaciones de las sumas, domina el más pequeño de los dos números. Si un número es substancialmente más pequeño que el otro, el resultado global es aproximadamente igual al más pequeño de los dos números.

Los parámetros del sistema usado para el ejemplo fueron tomados del Sistema C de la tabla de **SISTEMA DE PARAMETROS PARA TRES SISTEMAS DE SATÉLITES HIPOTÉTICOS.**

La evaluación completa del enlace se muestra en la siguiente tabla:

#### ENLACE DE SUBIDA (UPLINK)

1.- Potencia de salida en saturación del transmisor de la estación de tierra, 2000 W	33 dBW
2.- Pérdidas de back-off de la estación terrena	3 dB
3.- Pérdidas de alimentación y bifurcación de la estación terrena	4 dB
4.- Ganancia de la antena transmisora de la estación terrena (de la figura 20-19, 15m a 14 GHz)	64 dB
5.- PIRE de la estación de tierra	90 dBW
6.- Pérdidas atmosféricas adicionales del enlace de subida	0.6 dB
7.- Pérdidas del espacio libre (de la figura 20-20, a 14 GHz)	206.5 dB
8.- Densidad de potencia de la portadora en el satélite	- 117.1 dBW
9.- Pérdidas de alimentación y bifurcación del satélite	0 dB
10.- Relación G/T <sub>e</sub> del receptor del satélite	-5.3 dBK <sup>-1</sup>
11.- Relación C/T <sub>e</sub> del satélite	- 122.4 dBWK <sup>-1</sup>
12.- Relación C/N <sub>0</sub> del satélite	108.2 dB
13.- Relación C/N del satélite	30.2 dB
14.- Relación E <sub>b</sub> /N <sub>0</sub> del satélite	25.4 dB
15.- Velocidad de Bit	120 Mbps
16.- Esquema de modulación	8 PSK

#### ENLACE DE BAJADA (DOWNLINK)

1.- Potencia de salida en saturación del transmisor del satélite, 10 W	10 dBW
2.- Pérdidas de back-off del satélite	0.1 dB
3.- Pérdidas de alimentación y bifurcación del satélite	0.5 dB
4.- Ganancia de la antena transmisora del satélite (de la figura 20-19, 0.37m a 12 GHz)	30.8 dB
5.- PIRE del satélite	40.2 dBW
6.- Pérdidas atmosféricas adicionales del enlace de bajada	0.4 dB
7.- Pérdidas del espacio libre (de la figura 20-20, a 12 GHz)	205.6 dB
8.- Ganancia de la antena receptora de la estación de tierra (15m, a 12 GHz)	62 dB
9.- Temperatura equivalente del ruido de la estación de tierra	270 K
10.- Pérdidas de alimentación y bifurcación de la estación de tierra	0 dB
11.- Relación G/T <sub>e</sub> de la estación de tierra	37.7 dBK <sup>-1</sup>
12.- Densidad de potencia de la portadora en la estación de tierra	- 165.8 dBW
13.- Relación C/T <sub>e</sub> de la estación de tierra	- 128.1 dBWK <sup>-1</sup>
14.- Relación C/N <sub>0</sub> de la estación de tierra	100.5 dB
15.- Relación C/N de la estación de tierra	24.5 dB
16.- Relación E <sub>b</sub> /N <sub>0</sub> de la estación de tierra	19.7 dB
17.- Velocidad de Bit	120 Mbps
18.- Esquema de modulación	8 PSK

En la siguiente página se muestra un cuadro con la evaluación completa de un cálculo de enlace.

**EJEMPLO DE CALCULO DE ENLACE**

		ENLACE 1	ENLACE 2
1.	NOMBRE DEL PROYECTO		
2.	FECHA DE ELABORACION	1995	
3.	ESTACION TERRENA TRANSMISORA	MEXICO, D.F.	TIJUANA
4.	ESTACION TERRENA RECEPTORA	TIJUANA	MEXICO, D.F.
5.	DIAMETRO ANTENA TRANSMISORA	m	6.00
6.	FRECUENCIA DE OPERACION	Ghz	6 / 4
7.	GANANCIA DE LA ANTENA TRANSMISORA	dBi	49.40
8.	GANANCIA DE LA ANTENA RECEPTORA	dBi	38.20
9.	TEMPERATURA TOTAL DEL SISTEMA	dBK	18.13
10.	FIGURA DE MERITO DE LA ESTACION TERRENA RECEPTORA G/T <sub>R</sub>	dB/K	20.07
11.	DENSIDAD DE FLUJO EN SATURACION (SDF)	dBw/m <sup>2</sup>	-94.40
12.	AJUSTE DE GANANCIA	dB	10
13.	FIGURA DE MERITO DEL SATELITE (G/T)	dB/K	5.7
14.	BACKOFF DE ENTRADA EN EL TRANSPONDEDOR	dB	7.5
<b>ENLACE ASCENDENTE</b>			
15.	PERDIDAS POR DISPERSION	dBm <sup>2</sup>	162.21
16.	PERDIDAS POR ABSORCION ATMOSFERICA	dB	0.5
17.	BACKOFF DE ENTRADA EN EL TRANSPONDEDOR	dB	7.5
18.	EIRP / PORTADORA DESDE LA ESTACION TERRENA	dBW	41.94
19.	PERDIDAS POR ESPACIO LIBRE	dB	199.40
20.	PERDIDAS POR APUNTAMIENTO	dB	0.3
21.	PERDIDAS POR POLARIZADOR	dB	0.2
22.	CONSTANTE DE BOLTZMANN	dBW/Hz K	-228.6
23.	MARGEN POR PRECIPITACION	dB	0
24.	RELACION G/T DEL TRANSPONDEDOR	dB/K	3.8
25.	RELACION C/No. ASCENDENTE	dBHz	75.76
26.	RELACION C/N ASCENDENTE	dB	27.13
27.	RELACION C/I POR INTERMODULACION EN HPA	dB	32.13
28.	RELACION C/X POR POLARIZACION CRUZADA	dB	25.00
29.	RELACION C/X POR SATELITES ADYACENTES	dB	24.00
30.	RELACION C/N ASCENDENTE DEL SISTEMA	dB	21.13
<b>POTENCIA NOMINAL REQUERIDA EN HPA</b>			
31.	EIRP / PORTADORA DESDE LA EST. TERR.	dBW	41.94
32.	PERDIDAS EN GUIA DE ONDA	dB	1
33.	BACKOFF DE SALIDA	dB	-
34.	GANANCIA DE LA ANTENA EN TRANSMISION (TX)	dBi	49.40
35.	PERDIDAS EN EFICIENCIA POR EDAD	dB	-
36.	POTENCIA NOMINAL REQUERIDA / PORTADORA	dBW	-2.96
37.	POTENCIA NOMINAL REQUERIDA / PORTADORA	W	0.5
38.	MARGEN POR PRECIPITACION	dB	0
<b>ENLACE DESCENDENTE</b>			
39.	POTENCIA INYECTADA EN SATURACION POR T.P.	dBW	43.10
40.	BACKOFF DE SALIDA	dB	5
41.	EIRP / PORTADORA DESDE EL SATELITE	dBW	7.73
42.	PERDIDAS POR ESPACIO LIBRE	dB	195.7
43.	PERDIDAS POR APUNTAMIENTO	dB	0.3
44.	PERDIDAS POR POLARIZACION	dB	0.2
45.	MARGEN POR PRECIPITACION	dB	0
46.	CONSTANTE DE BOLTZMANN	dBW/Hz K	-228.6
47.	FIGURA DE MERITO (G/T) DE LA ESTACION TERRENA	dB/K	27.32
48.	RELACION C/No. DESCENDENTE	dBHz	59.67
49.	RELACION C/N DESCENDENTE	dB	11.04
50.	RELACION C/I POR INTERMODULACION EN T.P.	dB	18.19
51.	RELACION C/X POR POLARIZACION CRUZADA	dB	25.49
52.	RELACION C/X POR SATELITES ADYACENTES	dB	13.30
53.	RELACION C/N DESCENDENTE DEL SISTEMA	dB	8.43
<b>FACTORES DE CALIDAD DEL ENLACE GLOBAL</b>			
54.	RELACION C/N TOTAL DEL SISTEMA	dB	8.20
55.	RELACION S/N PARA SEÑALES ANALOGICAS EN FM/FDMA	dB	-
56.	RELACION C/N TOTAL VS. C/N REQUERIDA PARA SEÑALES DIGITALES	dB	2.25
	FSK/FDMA		5.77
<b>CONSUMO DE RECURSOS SATELITALES</b>			
57.	% POTENCIA CONSUMIDA POR LA PORTADORA EN EL T.P.	dBW	0.145
58.	ANCHO DE BANDA REQUERIDO POR PORTADORA	KHz	100

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

## **CONCLUSIONES:**

La llegada de los satélites ha modificado notablemente la forma de vida de la mayor parte de la población del mundo.

Ya que usando a los satélites como herramienta se puede conocer con mayor precisión los recursos naturales de la tierra y los fenómenos meteorológicos; y usándolo como medio de comunicación, las distancias entre ciudades y los países se han acortado y ahora pueden intercambiar todo tipo de información casi instantáneamente; y al usuario más allá de las capas atmosféricas podemos observar y comprender mejor el universo.

La comunicación vía satélite es un medio de comunicación radioeléctrico que utiliza las ondas de radio como portadoras de información y que es un medio de gran capacidad pues por el se pueden realizar cientos de conversaciones telefónicas simultáneas o la transmisión de varias señales de televisión, además de otros tipos de información.

En general, todos los satélites artificiales funcionan bajo el mismo principio y constan de varias partes comunes, independientemente de su objetivo en órbita alrededor de la tierra. Es obvio que hay algunas diferencias fundamentales entre ellos, pero de cualquier forma, constan por ejemplo, de una buena cantidad de celdas solares para alimentarse de energía, de antenas para transmitir su información a ciertos puntos de la tierra y también para poder recibir instrucciones o cualquier otro tipo de señales desde dichos puntos de la tierra, así como también constan de medios de propulsión para corregir su órbita, posición u orientación con respecto a la tierra.

Los satélites tienen la ventaja de ser de instalación rápida; con una gran facilidad de expansión; poseen una amplia cobertura; permiten el cambio de su configuración; se pueden introducir nuevos servicios; consta de un repetidor, el cual esta muy vigilado; tiene disponibilidad del 99.99 % y el servicio es de un solo proveedor.

Pero tienen la desventaja de que el tiempo de vida es limitado, aproximadamente 10 años; hay un retardo considerable en la señal; su costo de instalación y de servicio es alto y es muy sensible a los efectos climáticos.

Para poder evaluar la calidad de comunicación que hay en un canal de comunicación vía satélite, tomando en cuenta todos los niveles de potencia del sistema usamos un procedimiento matemático al cual llamaremos el cálculo de enlace.

El cálculo de enlace vía satélite nos permite obtener los valores de potencia necesaria para comunicar dos o más **Estaciones Terrenas (E/T)** tomando en cuenta las consideraciones físicas relacionadas con el viaje de la señal por el espacio libre, con el procesamiento que recibe por parte de los equipos (entre ellos al satélite mismo), y a la ubicación geográfica de los puntos a comunicar.

En el contexto del diseño de redes satelitales, el cálculo de enlace constituye la base matemática para el dimensionamiento de los equipos que se utilizan en las E/T.

La presencia de ruido genera una degradación de señal útil. **La Relación Portadora -a- Ruido (C/N)**, se refiere a la diferencia existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia de ruido existente en el sistema.

El cálculo de enlace satelital consta de tres partes Principales:

- 1) Enlace ascendente
- 2) Enlace descendente
- 3) Evaluación del enlace

Cada una de las partes anteriores aglutinan una serie de conceptos físicos y procedimientos matemáticos con cierta independencia que nos permite manejarlos por separado.

El **Margen de Enlace** es el parámetro que nos indica la calidad total del enlace, que considera a la potencia en el equipo receptor de acuerdo a una calidad esperada en la información recibida y la calidad de la información proporcionada por el enlace, en función de la potencia total de la portadora.

Cuando se diseña un enlace debe tomarse algún **Criterio de Diseño** que fije las condiciones en las que se espera, o bien, se desea que el enlace opere satisfactoriamente, de ahí que una vez establecidos dichos criterios se considera si el margen del enlace es bueno o no; en caso de ser satisfactorio, se da por concluido el cálculo y se procede a la recuperación de los valores correspondientes a los parámetros más relevantes como; la PIRE de la E/T y la PIRE del satélite por portadora, esto es las potencias controlables de nuestro enlace. Para el caso en que el margen del enlace no sea el adecuado se realiza nuevamente el cálculo bajo diferentes condiciones de potencia, para lo cual debemos cambiar el valor de la potencia con la que transmite la E/T, así hasta obtener los resultados deseados.



**BIBLIOGRAFIA**

**1.- Rodolfo Neri Vela , "Satelites de Comunicaciones"**

**Editorial Mc Graw Hill**

**2.- Dr. Kamilo Feher, " Digital Communications Satellite / Earth Station  
Engineering"**

**Editorial Prentice Hall**

**3.- Wayne Tomasi, " Electronic Communications Systems"**

**Editorial Prentice Hall**