UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

“SATÉLITES DE ÓRBITA BAJA (LOW EARTH ORBIT SATELLITES): CARACTERÍSTICAS, TECNOLOGÍA Y APLICACIONES”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(ÁREA: ELÉCTRICA - ELECTRÓNICA)
P R E S E N T A:

LIZBETH ERIKA URESTY ESTRADA

ASESOR:
ING. RAÚL ROBERTO BRIBIESCA CORREA

SAN JUAN DE ARAGÓN, EDO. DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2006

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

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.

A mi madre, Adriana Estrada Ruiz, quien ha sido el principal y más grande apoyo en mi vida… gracias mamá, gracias por todo el esfuerzo que hiciste por mí para que lograra terminar una carrera universitaria, gracias por todas las noches de desvelo que estuviste a mi lado, gracias por todo el amor que me brindas, sin ti jamás lo hubiera logrado, TE AMO CON TODO MI CORAZÓN.

A mi abuelita, María de los Angeles Ruiz Ávila, por sus cuidados y amor que desde niña me ha brindado.

A mis hermanos, Ivonne, Mauricio y Karen, quienes me motivaron para concluir este proyecto, son los mejores hermanos que pude tener.

A mi tío, Guillermo Estrada Ruiz, por estar siempre al pendiente de mí y de mis hermanos, eres un gran hombre y mi ejemplo a seguir.

Al amor de mi vida, Alejandro Molina Cueli, por su ayuda incondicional durante los años que hemos estado juntos y quien ha sido un apoyo fundamental para concluir este trabajo de tesis. Gracias mi amor.

A Marino Alderete, por su ayuda a lo largo de todo este tiempo.

A mis amigos, quienes siempre me han acompañado y aconsejado en momentos felices y difíciles de mi vida.

Para todos y cada uno de ellos todo mi amor.

Lizbeth Erika Uresty Estrada

ÍNDICE

OBJETIVO 1

INTRODUCCIÓN 2

CAPÍTULO I ANTECEDENTES

1.1 Cómo está constituido un satélite 7

1.1.2 Antenas 19

1.2 Puesta en órbita de un satélite 24

1.3 Clasificación de los satélites 27

1.3.1 Por su uso 27

1.3.2 Por su órbita 28

1.3.3 Por su estabilización 30

1.3.4 Por su misión 32

1.3.5 Por su servicio 34

CAPÍTULO II SATELITES DE ORBITA BAJA

2.1 Primeros lanzamientos de satélites de órbita baja 36

2.2 Lanzamientos no exitosos 39

2.3 Órbita polar 41

2.4 Satélites “little LEO” 44

2.5 Satélites “big LEO” 48

CAPÍTULO III ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN UNA RED SATELITAL

3.1 Segmento espacial 54

3.2 Segmento terrestre 59

3.2.1 Estaciones terrenas 61

3.3 Segmento de usuario 70

3.4 Reutilización de frecuencias 72

CAPÍTULO IV **MULTIPLEXAJE Y MODULACION UTILIZADAS EN LOS SATELITES DE ORBITA BAJA**

4.1 Multiplexaje por división de frecuencia 75

4.2 Multiplexaje por división de tiempo 75

4.3 Multiplexaje por división de código 76

4.4 Técnicas de modulación 76

4.5 Acceso múltiple 79

4.5.1 Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) 80

4.5.2 Acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA) 88

4.5.3 Acceso múltiple por división de código (CDMA) 91

CAPÍTULO V **APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE LOS SATELITES DE ORBITA BAJA**

5.1 Diseño de un sistema satelital de órbita baja 94

CAPÍTULO VI **SISTEMAS SATELITALES QUE UTILIZAN SATELITES DE ÓRBITA BAJA**

6.1 Iridium 104

6.2 Globalstar 108

6.3 Teledesic 112

CONCLUSIONES 115

APÉNDICES

APÉNDICE A 118

APÉNDICE B 119

APÉNDICE C 120

BIBLIOGRAFÍA 121

OBJETIVO

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo exponer las características de los satélites de órbita baja, la tecnología que utilizan y los servicios que proporcionan de acuerdo al sistema satelital al cual pertenecen, como una opción más dentro del campo de las telecomunicaciones; así como también proporcionar información acerca de otros tipos de satélites, como los que se encuentran en órbita geoestacionaria, en órbita polar y en órbita elíptica, y algunos de los servicios que ofrecen hoy en día.

INTRODUCCION

El hombre, a través de la historia, ha utilizado diferentes medios de comunicación, desde pinturas rupestres, señales de humo, palomas mensajeras, etc. hasta sofisticados sistemas de comunicación inalámbrica, pasando por el telégrafo, el teléfono y la televisión, hasta las microondas, fibra óptica y satélites.

Un medio importante de comunicación que, a lo largo de los años ha evolucionado de manera progresiva, es el satélite, el cual surge de la necesidad de comunicarse a largas distancias, primero de manera nacional y posteriormente internacional, en el menor tiempo posible.

Como ha sucedido a lo largo de la historia del hombre, todo comenzó con una idea, y esta fue comunicarse globalmente con el menor número de satélites posible. Arthur C. Clarke escribió un artículo en el cual planteó esta idea y explicó cómo es posible obtener cobertura global con sólo tres satélites localizados es órbita geoestacionaria.

Estos satélites debían cumplir con ciertas características, como girar en el mismo sentido de rotación de la Tierra, tener una velocidad constante con el propósito de mantener al satélite en órbita y estar a una altura de 36 000 km, aproximadamente, sobre el nivel del mar, tomando como referencia un plano ecuatorial imaginario.

Al cumplir los satélites con estas características, se crearía la ilusión de que éstos permanecen fijos en un punto, es decir, permanecen geoestacionarios.

Con el paso de los años, esta idea se concretó y en 1957 Rusia lanzó el primer satélite artificial llamado ***Sputnik***, que se mantuvo en órbita baja y transmitió información de telemetría durante 21 días. Después de este logro, muchos fueron los que consideraron las ventajas, beneficios, ganancias y prestigio asociados con las comunicaciones vía satélite.

En 1958, Estados Unidos lanzó el satélite ***Score***, utilizado para transmitir el mensaje de Navidad del presidente Eisenhower. En 1962, ***Telstar*** y ***Relay***, satélites de órbita media, fueron lanzados al espacio y en 1963 fue puesto en órbita ***Syncom***, el primer satélite geoestacionario.

Pero no fue sino hasta el 6 de abril de 1965 cuando la era de los satélites geoestacionarios comerciales inició con el lanzamiento de ***Early Bird*** en Cabo Cañaveral, patrocinado por **COMSAT** (***Communications Satellite Corporation***), el cual proporcionaba servicios de telefonía y televisión. Posteriormente, sistemas como **INTELSAT** y **MOLNIYA** comenzaron a proporcionar servicios.

INTELSAT fue el primer sistema satelital global de tipo comercial que perteneció y fue operado por un consorcio de más de 100 países, de ahí su nombre ***International Telecommunications Satellite Organization***. A la fecha, sigue siendo el mayor proveedor de comunicaciones con la cobertura más extensa y el mayor rango de servicios ofrecidos.

En 1982 surge **INMARSAT** (***International Maritime Satellite Organization***) que fue el primer sistema de telefonía satelital móvil de carácter marítimo y en 1988 extendió sus servicios a transmisión de datos.

También surgieron sistemas que utilizan satélites de órbita baja como ***Globalstar***, que brinda servicios de telefonía móvil, transmisión de datos a unidades fijas o móviles y terminales personales.

Otro tipo de órbita que está siendo explotada por ***New ICO*** es la órbita media (***MEO, Medium Earth Orbit Satellite***). Este sistema presta servicios de conexión a Internet, fax, transmisión de voz y datos a terminales fijas o móviles.

Algunos de estos sistemas son utilizados con propósitos militares, con el objetivo de tener completo dominio en el mercado y ser más competitivos en cuanto a tácticas y vigilancia militares se refieren.

A continuación se presenta una breve cronología con los eventos más importantes que han acontecido durante la era satelital.

1945	Arthur C. Clarke escribe un artículo sobre la comunicación global.
1957	Lanzamiento del satélite *Sputnik*.
1964	SYNCOM, primer satélite geoestacionario.
1965	INTELSAT I, "*Early Bird*", el primer satélite geoestacionario comercial.
1982	Se pone en funcionamiento INMARSAT-A, primer sistema satelital de telefonía móvil.
1988	INMARSAT-C, primer sistema satelital móvil para transmisión de datos.
1993	INMARSAT-M, MOBILESAT (Australia), primeros sistemas satelitales de telefonía móvil digital.
1996	INMARSAT-3, telefonía satelital con terminales *laptop*.
1998	IRIDIUM, primer sistema satelital global de órbita baja para telefonía utilizando terminales portátiles (*handheld terminals*)
2000	ASTRA, sistema satelital para Internet de alta velocidad.
2001	Sistemas satelitales para comunicación multimedia fija, móvil y portátil como *Spaceway*, *SkyBridge*, *Teledesic*, etc.
2003	Comienza operaciones NEW ICO

En el presente trabajo de tesis, se plantean tanto ventajas como desventajas de los sistemas satélites que no se encuentran en la órbita geoestacionaria, específicamente de los satélites de órbita baja ***LEO*** (***Low Earth Orbit***), por sus siglas en inglés, como una alternativa más en el campo de las telecomunicaciones.

También es importante mencionar que hay aplicaciones específicas, en las cuales sólo los satélites de órbita baja son requeridos, como por ejemplo, misiones de reconocimiento de la superficie de la Tierra para recolectar información con motivos militares o simplemente para una mejor aplicación de los recursos.

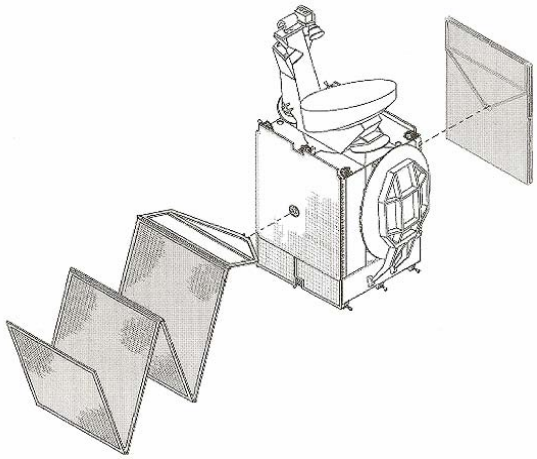
En meteorología, este tipo de satélites son muy utilizados, ya que gracias a la altura a la que orbitan, las fotos de la Tierra que se obtienen son mejores y más detalladas. De igual manera, las imágenes obtenidas son utilizadas en el campo de la cartografía para la realización de mapas.

Otra aplicación importante es en el Sistema de Posicionamiento Global (***GPS, Global Positioning System***), en el cual se utilizan 24 satélites de órbita baja conocido también como el sistema ***NAVSTAR,*** el cual es ampliamente utilizado en diferentes áreas como arqueología, geología, geografía y en mercados específicos como transportación terrestre, marítima o aérea.

Así pues, veremos que el uso de los satélites, en cualquier órbita en la que se encuentren, es básica hoy en día para el hombre en distintos ámbitos de la vida y como consecuencia, la tecnología satelital seguirá desarrollándose y evolucionando en los próximos años, esperando que sus ventajas sean utilizadas de manera segura y apropiada.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES



1.1 Cómo está constituido un satélite

Muchas han sido las transformaciones que han sufrido los satélites a través de los años, mismas que se han adaptado a las normas existentes, así como a las especificaciones, misiones, objetivos y necesidades en particular para los cuales un satélite es diseñado.

Un satélite es un repetidor de radiofrecuencia que permite la comunicación a larga distancia en cualquier parte del mundo. Algunos de los satélites en órbita llevan consigo una cámara, con la cual se toman fotografías de la Tierra que posteriormente son utilizadas en la elaboración de mapas cada vez más precisos.

Estas fotografías también son utilizadas por los meteorólogos para pronosticar las condiciones climáticas que se presentarán en ciertos lugares del planeta. De hecho, las imágenes utilizadas en los noticieros para el pronóstico del tiempo son imágenes de satélite.

Los satélites también son utilizados, entre muchas otras cosas, para enviar mensajes a un receptor en particular, el cual puede estar abordo de un barco en medio del océano o en un vehículo en el desierto, o para proporcionar el punto geográfico en el cual se encuentra una persona, lo que se conoce como ***GPS*** (***Global Positioning System***).

Llamadas telefónicas pueden ser transmitidas vía satélite, por ejemplo: si se desea llamar a una persona en alguna ciudad de Estados Unidos, la llamada es enviada al espacio a un satélite, lo que se conoce como enlace de subida (***uplink***), y después retransmitida a una estación terrena en ese país, lo que se conoce como enlace de bajada (***downlink***), y de ahí enviada al teléfono del receptor.

Un satélite está compuesto por cadenas individuales de equipo llamadas **transpondedores**, término derivado de las palabras ***trans****mitter* y *res****ponder***. En la figura 1.1 se representa un diagrama de bloques de un transpondedor.

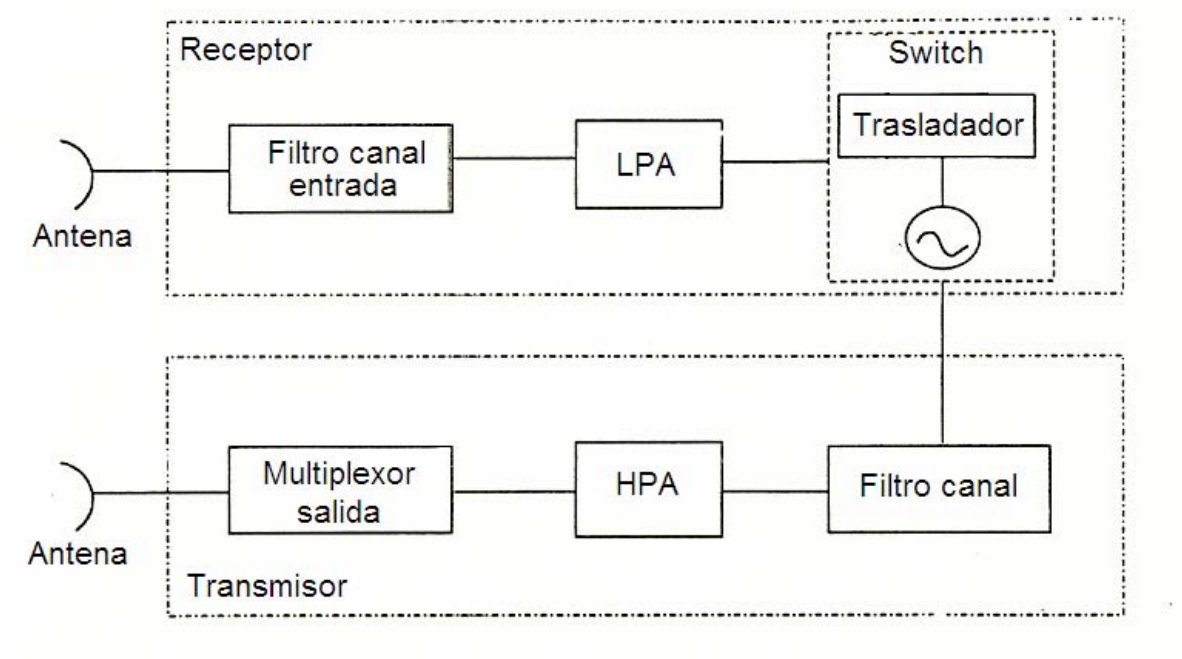


Figura 1.1 Diagrama a bloques de un transpondedor

Un transpondedor se puede definir como un sistema que básicamente se compone de un filtro pasabanda, que sirve para seleccionar la banda de frecuencias que será utilizada por el canal; un trasladador de frecuencia, utilizado para cambiar las frecuencias de un nivel a otro y un amplificador de salida. Una vez amplificadas las señales, los canales son recombinados en un multiplexor de salida para la retransmisión de las mismas.

Los satélites están conformados por diferentes subsistemas, cada uno de ellos con una función específica, que en conjunto, logran que el satélite cumpla su misión con éxito. Estos son:

- **Subsistema de propulsión**
- **Subsistema de potencia**
- **Subsistema de comunicaciones**
- **Subsistema estructural**
- **Subsistema de control térmico**
- **Subsistema de posicionamiento y orientación**
- **Subsistema de telemetría y comando**

Subsistema de propulsión

Proporciona incrementos de velocidad y giros necesarios para mantener al satélite en posición correcta. Cuando se requiere de una maniobra de corrección considerable, es decir, cuando los volantes internos con los que cuenta el satélite no son suficientes para corregir la posición u orientación del mismo, entran en acción los propulsores, ya que estos proporcionan la fuerza y el empuje requeridos para dicha maniobra.

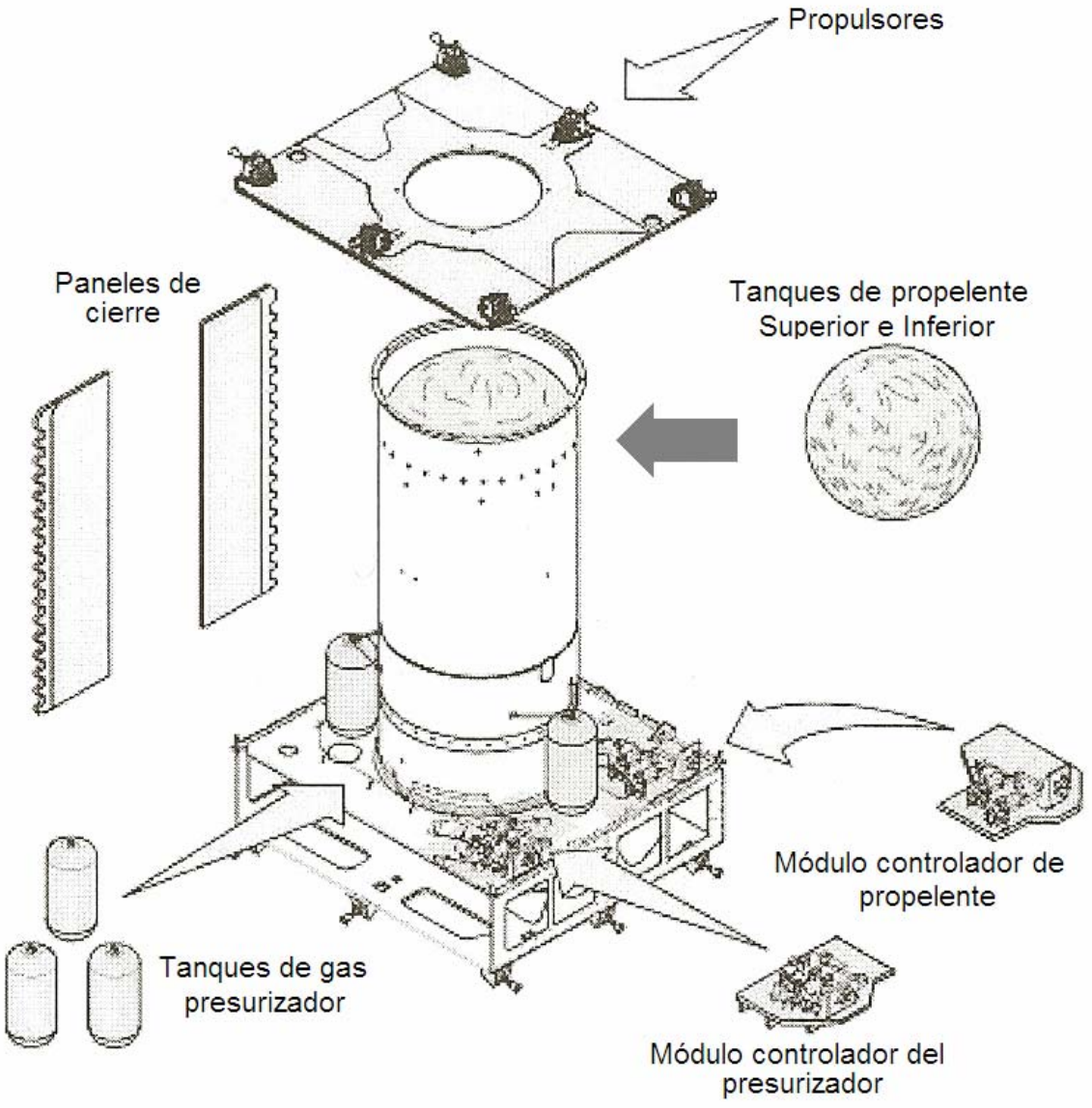


Figura 1.2 Subsistema de propulsión

Los propulsores también se utilizan cuando se pone en órbita un satélite geoestacionario, es decir, cuando se activan los motores de perigeo (punto más cercano a la Tierra) y apogeo (punto más lejano a la Tierra). En la figura 1.2 se muestra un diagrama con los componentes del subsistema de propulsión.

Existen motores químicos y eléctricos, los primeros utilizan reacciones químicas para obtener el impulso que el satélite requiere para corregir su posición, este impulso depende del tipo de propelente que se utilice. Los motores eléctricos también utilizan propelentes, y para provocar la reacción química utilizan potencia eléctrica.

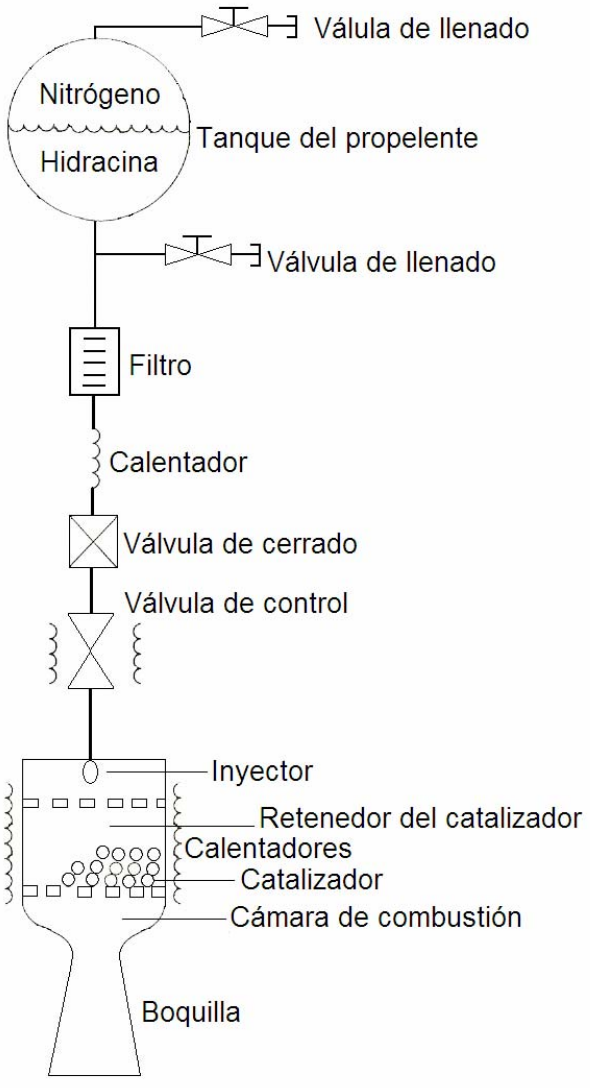


Figura 1.3 Elementos del subsistema de propulsión

El propelente es el material que es utilizado para lograr reacciones químicas que activarán los propulsores y realizarán las maniobras necesarias para corregir la posición y orientación de un satélite. El sistema monopropelente catalítico que utiliza hidracina (N_2H_4) es el más utilizado.

En la figura 1.3 se muestran los elementos que constituyen este subsistema. Se puede observar que la hidracina se almacena en tanques para después pasar a través de filtros y válvulas hasta llegar al propulsor, en el cual se encuentra una cámara de combustión y una boquilla de expansión.

Subsistema de potencia

Este subsistema se encarga de generar energía eléctrica que es requerida para el funcionamiento del satélite, por medio de los paneles solares con los que cuenta. Esta misma energía también es almacenada en baterías para ser usada en los momentos cuando los paneles no reciben luz solar, como por ejemplo, en un eclipse o cuando los satélites pasan por "atrás" de la Tierra. La energía eléctrica sirve para operar el subsistema de comunicaciones. En la figura 1.4 se representan los paneles solares que utiliza un satélite.

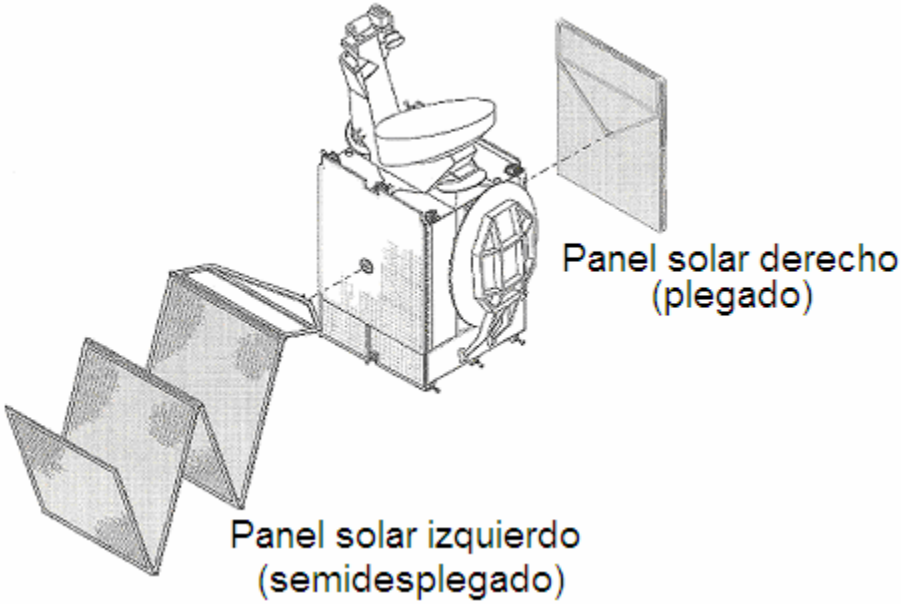


Figura 1.4 Paneles solares

Subsistema de comunicaciones

Este subsistema se encarga de las funciones de transmisión y recepción de señales, las cuales son transmitidas desde la Tierra, recibidas por medio de las antenas receptoras, amplificadas o procesadas y enviadas de regreso a una estación terrena o a otro satélite usando las antenas transmisoras. En la figura 1.5 se ejemplifica el subsistema de comunicaciones.

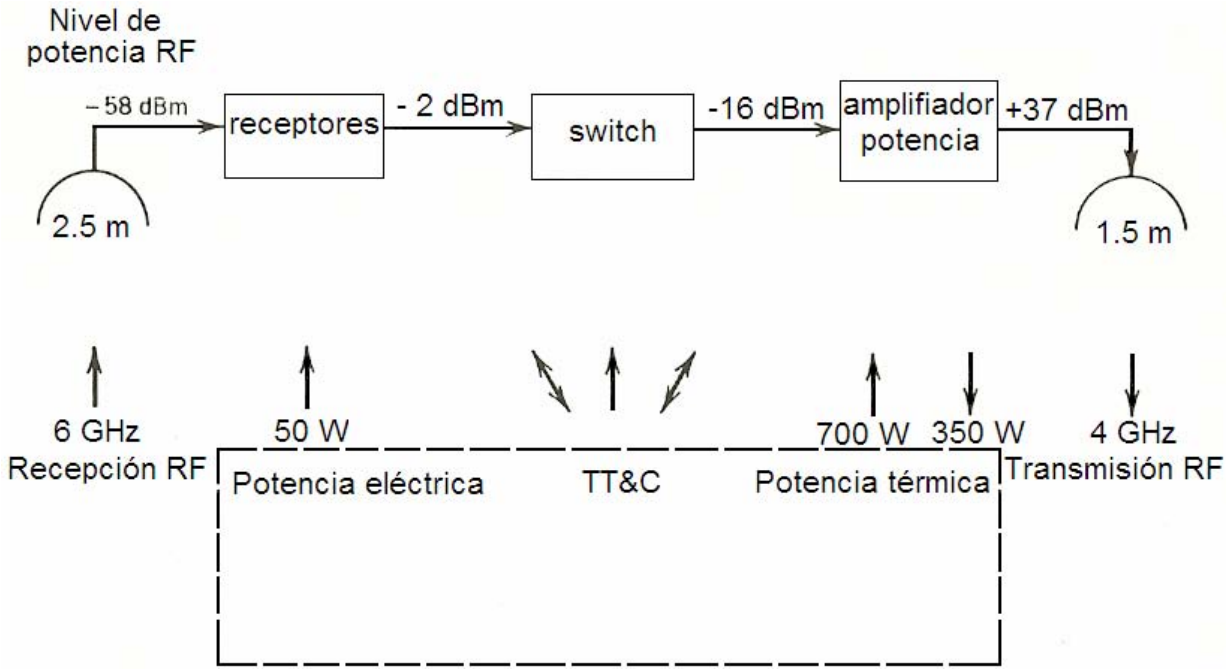


Figura 1.5 Subsistema de comunicaciones

Los sistemas de comunicaciones satelitales tienen bandas de frecuencias específicas asignadas por la **ITU (*International Telecommunication Union*)**. A continuación en la tabla 1.1 se representan dichas asignaciones:

Tabla 1.1 Asignación de frecuencias

BANDA	FRECUENCIA (GHz)
VHF	0.03–0.3
UHF	0.3–1.0
L	1–2
S	2–4
C	4–8
X	8–12
Ku	12–18
K	18–27
Ka	27–40
V	>40

Subsistema estructural

La estructura del satélite es la que mantiene fijo todo el equipo que transporta, transmisión y recepción, propulsores, paneles solares, etc. Como los satélites están expuestos a distintas fuerzas, desde su lanzamiento hasta el término de su vida útil, la estructura debe ser lo suficientemente fuerte y rígida para mantener en su lugar todas y cada una de las partes que componen el satélite, pero al mismo tiempo debe ser resistente y ligera.

En la figura 1.6 se ilustran las partes que conforman la estructura de un satélite de estabilización por giro. La fuerza de atracción que ejerce la Tierra, los posibles impactos de pequeños cuerpos celestes, los movimientos causados por los propulsores, la puesta en órbita, son solo algunas de las fuerzas a las que están expuestos los satélites.

Existen diferentes materiales que se utilizan para la fabricación de estructuras de satélites. Estos varían dependiendo del diseño del satélite, es decir, el tamaño y número de antenas, características del equipo de transmisión y recepción, etc. Sólo por mencionar

algunos, los materiales que se utilizan son: aluminio, berilio, fibra de carbón, acero, titanio, entre otros.

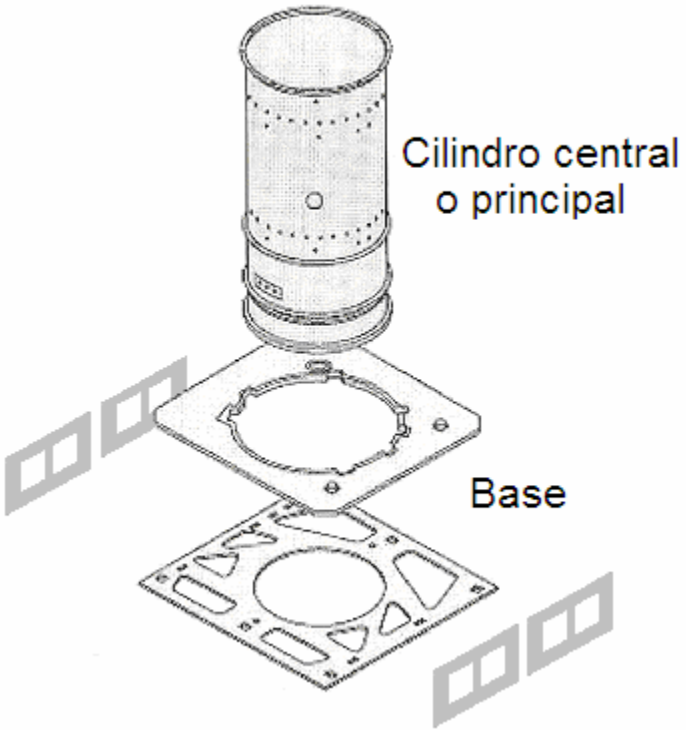


Figura 1.6 Subsistema estructural

Subsistema de control térmico

Mantiene la temperatura de los equipos en el rango apropiado para su correcto funcionamiento. El calor que se genera dentro del satélite es enviado fuera de él para que no intervenga con el funcionamiento del mismo. Esto se logra por medio de radiación, es decir, transfiriendo el calor sobrante al espacio por medio de espejos de cuarzo que rechazan el calor que proviene del exterior, provocado por el Sol o por la Tierra misma.

Otra manera de proteger los equipos es cubriéndolos con materiales aislantes, que los protegen de los cambios de temperatura, por ejemplo durante un eclipse; como el satélite deja de estar en contacto con el Sol, su temperatura baja drásticamente, lo cual, al igual que un incremento en la temperatura, dañaría considerablemente los equipos ya que son sensibles al frío o al calor. En la figura 1.7 se muestran como éste subsistema transfiere el exceso de calor hacia el espacio.

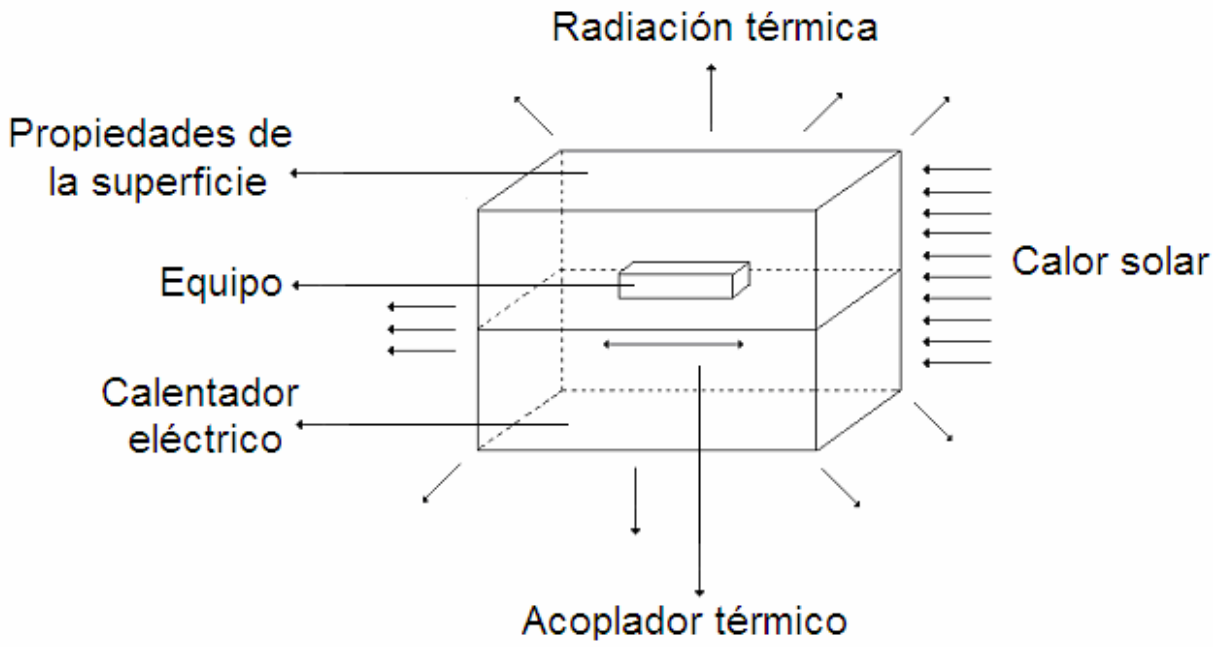


Figura 1.7 Subsistema de control térmico

Subsistema de posicionamiento y orientación

Dentro de este subsistema, se realiza un monitoreo constante de la posición y orientación del satélite y la información obtenida es enviada a través del subsistema de telemetría y control a la Tierra, para realizar los ajustes correspondientes en caso de ser requeridos o simplemente para obtener información acerca del funcionamiento del satélite

Para calcular la distancia a la cual se encuentra el satélite, se manda una señal de prueba, llamada señal piloto, desde el centro de control hacia el satélite, la cual es enviada de regreso; la diferencia de fases de estas señales junto con el tiempo de retraso da como resultado la distancia a la cual se encuentra el satélite.

Es también importante mantener una correcta orientación de las antenas con respecto a la Tierra, es decir, que el área de cobertura sea la adecuada, de lo contrario, se pueden presentar problemas. Por ejemplo, un programa de televisión o una simple llamada telefónica pueden verse interrumpidos.

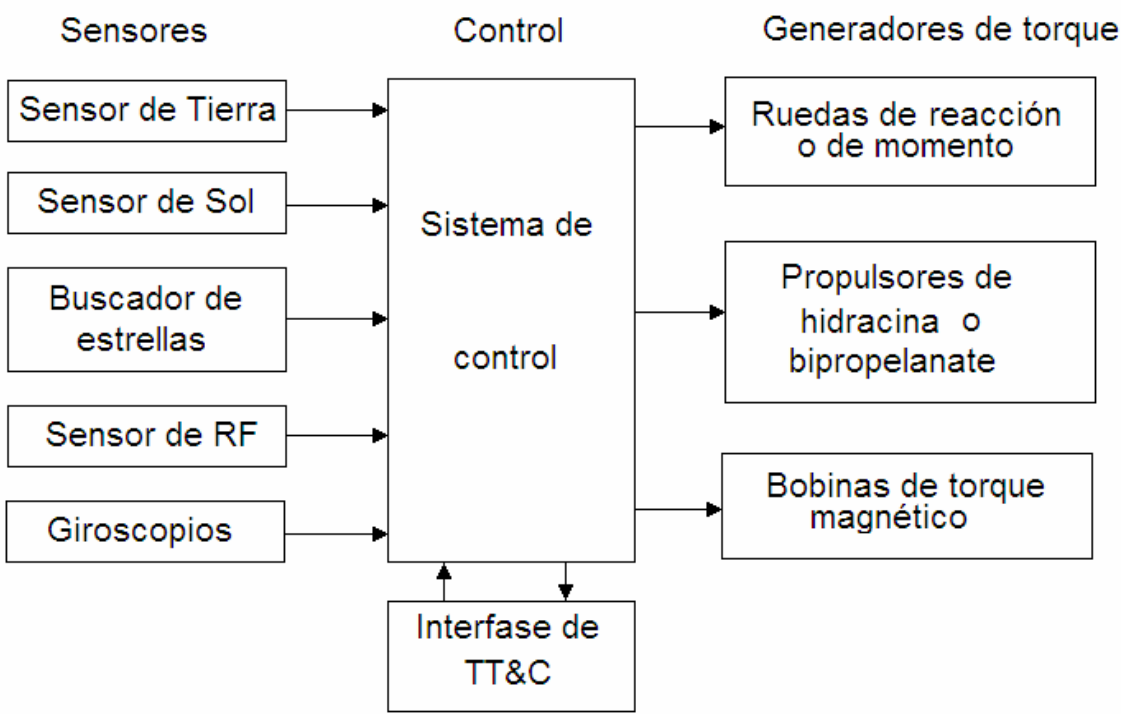


Figura 1.8 Subsistema de posicionamiento y orientación

Cuando el centro de control detecta variaciones en la posición u orientación del satélite, se llevan acabo los ajustes correspondientes, ya sea activando algunos de los volantes con los que cuenta el satélite o si se requiere un ajuste de mayor magnitud se emplean los propulsores, esto con el fin de economizar el propelente, ya que el objetivo es que no se termine antes de lo previsto, de lo contrario, la vida útil del satélite puede verse afectada. En la figura 1.8 se muestra un diagrama a bloques del subsistema de posicionamiento y orientación.

Subsistema de telemetría y comando

Este subsistema permite conocer la posición, orientación y comportamiento del satélite. Los operadores en la estación terrena necesitan estar en contacto permanente con el satélite para transmitir comandos y señales de prueba que les permiten obtener información acerca del mismo. En la figura 1.9 se muestra un diagrama a bloques de este subsistema,

en el cual están involucradas las órdenes y las señales de prueba que son enviadas al satélite.

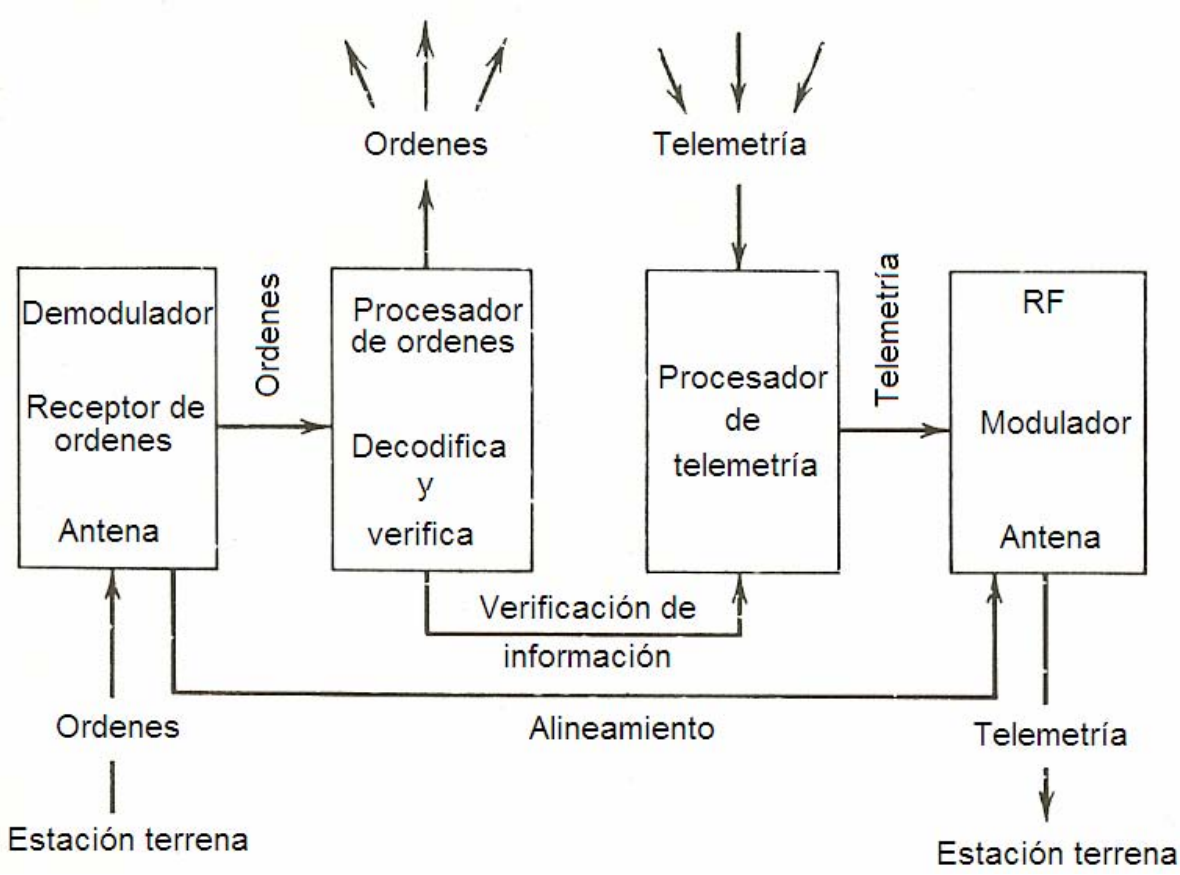


Figura 1.9 Subsistema de telemetría y comando

El subsistema de telemetría y comando recibe las órdenes desde la estación terrena para realizar las correcciones necesarias y mantener el buen funcionamiento del satélite. Por ejemplo, se le puede ordenar al satélite que haga la conmutación de algún equipo, activación de propulsores, despliegue de paneles solares, reorientación, etc.

En algunas ocasiones, hay funciones que el satélite realiza de manera autónoma, por medio de sensores y equipo de control con los que está equipado, siempre y cuando estén dentro de los parámetros asignados, de lo contrario, los comandos serán mandados directamente desde el centro de control en Tierra.

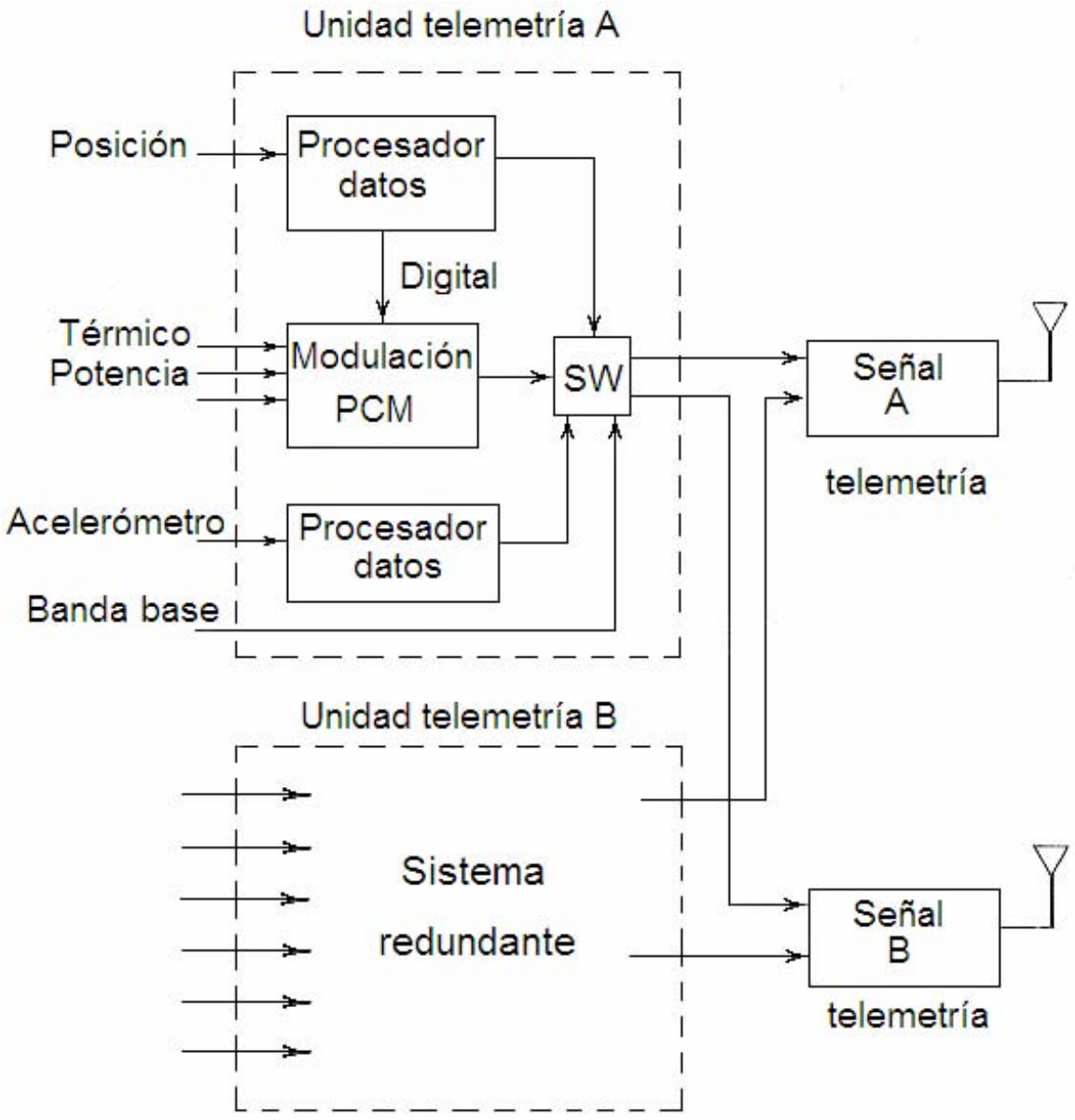


Figura 1.10 Módulo de telemetría

En la figura 1.10 se ejemplifica un módulo de telemetría con su respectivo sistema redundante localizado dentro del satélite y, si llegara a ser necesario, llevar a cabo en cualquier momento las correcciones necesarias por el propio satélite.

1.1.2 Antenas

Las antenas son parte importante para cualquier sistema de comunicaciones, hablando de los sistemas satelitales, son las que reciben las señales provenientes de las estaciones terrenas y, después de ser procesadas por el satélite, es decir, amplificación y conversión de frecuencia, son transmitidas de regreso hacia la Tierra.

Las antenas pueden definirse como la interfase entre una onda electromagnética que se encuentran en el espacio libre y una onda guiada, es decir, una vez "liberada" la señal de radiofrecuencia, ésta será recibida por una antena, guiada para ser procesada y posteriormente ser retransmitida.

Existen distintos tipos de antenas, pero su funcionamiento es básicamente el mismo; un transmisor de radiofrecuencia es el encargado de excitar corrientes eléctricas en la superficie de la antena y radiar ondas electromagnéticas.

En el caso que la misma antena se utilice como receptora, una onda de radio incidente es la encargada de excitar las corrientes eléctricas en la antena que son conducidas al receptor. Las antenas se pueden clasificar básicamente en: antena reflectora, antena de lentes, antena helicoidal y arreglos de antenas.

Las antenas reflectoras son de las más utilizadas en los satélites, ya que su diseño estructural es muy sencillo y no son tan pesadas. Las antenas cuentan con elementos llamados alimentadores, que generalmente son antenas de tipo corneta que se conectan a guías de onda y emiten energía hacia un reflector parabólico, o bien, captan la energía para enviarla a los equipos de recepción.

Puede decirse que las antenas de lentes, que son la contraparte de las antenas reflectoras desde el punto de vista óptico, no tienen bloqueo de alimentador, pero son más pesadas a frecuencias bajas y los lentes de la superficie no se encuentran emparejados.

Las antenas de corneta son frecuentemente utilizadas como alimentadores para iluminar los reflectores de las antenas y de esta manera obtener haces de gran cobertura sobre la Tierra. Una corneta es parte de la guía de onda y lleva ondas electromagnéticas. Como se muestra en la figura 1.11 las cornetas pueden ser piramidales 1.11 (a) o cónicas 1.11 (b).

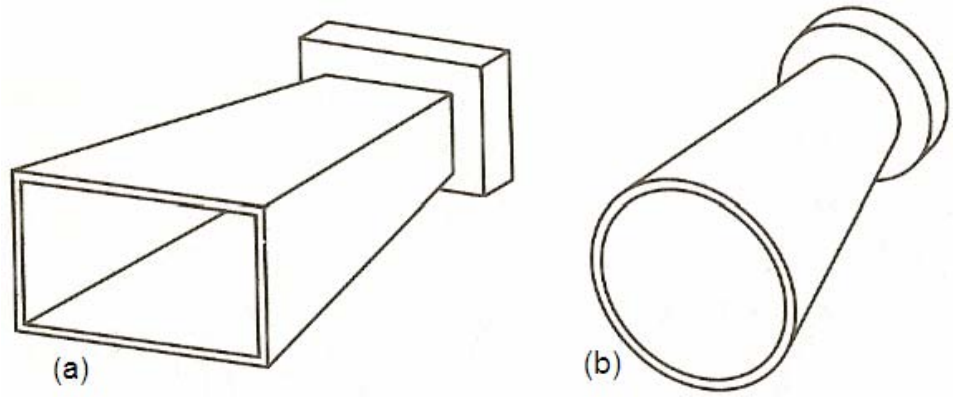


Figura 1.11 Antenas de corneta: a) piramidal b) cónica

Los diseños de antenas de lentes y reflectoras utilizan la geometría parabólica. Básicamente consisten en un reflector y un alimentador, este último colocado en el foco de la parábola. En la figura 1.12 se muestra un ejemplo geométrico de un reflector y un alimentador, en donde *f* es el foco, *v* es el vértice y D es el diámetro de apertura.

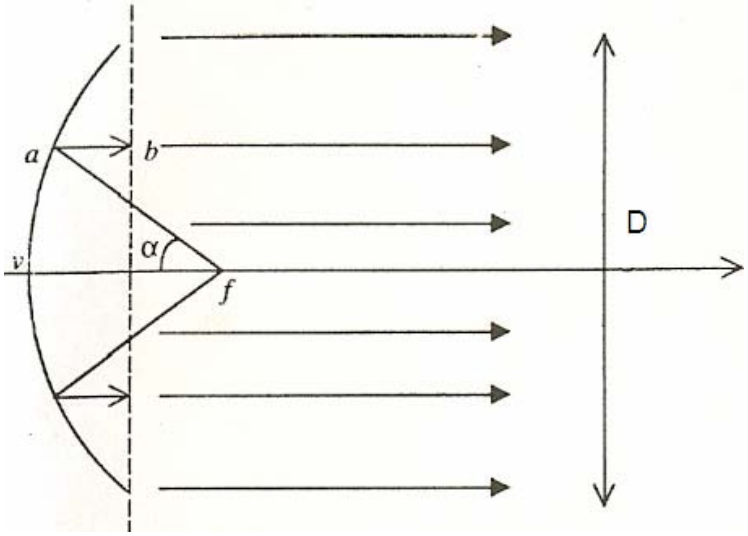


Figura 1.12 Geometría de una antena parabólica

Un punto importante dentro del tema de las antenas es la ganancia. Una antena parabólica de dimensiones pequeñas puede abarcar mayor extensión territorial sobre la Tierra a diferencia de una de mayor tamaño, esto se debe a que el haz principal de esta última es más angosto y la energía se concentra en un área muy pequeña.

En una antena parabólica, cuanto más grande sea la frecuencia de operación más grande será la concentración de energía. Este es el caso de las antenas de corneta, las Cassegrain y las de tipo offset. La ganancia[1] de este tipo de antenas está dada por:

$$G = z \frac{4\pi A_t}{\lambda^2} \qquad (1.1)$$

en donde:

z = eficiencia de la apertura de la antena (55-75%)

A_t = es el área de la apertura de la antena

λ = longitud de onda a la frecuencia de operación

En la mayoría de las antenas parabólicas el alimentador se encuentra en el foco del reflector, por ejemplo, las antenas Cassegrain y Gregorian, como se puede observar en la figura 1.13 (a), aunque existen variaciones como las antenas tipo offset.

En la figura 1.13 (b) se muestra una antena Cassegrain con alimentador central y en la figura 1.13 (c) se muestra una antena Gregorian con el mismo arreglo.

En estos arreglos se puede observar que los alimentadores se encuentran en uno de los focos de un subreflector y el otro foco coincide con el foco del reflector principal. En las antenas tipo offset o asimétricas el subreflector es colocado de manera que no bloquea la energía que es radiada por la antena.

[1] *Martin, James,* ***Communications Satellite Systems****, Prentice-Hall, 1978, pág 103*

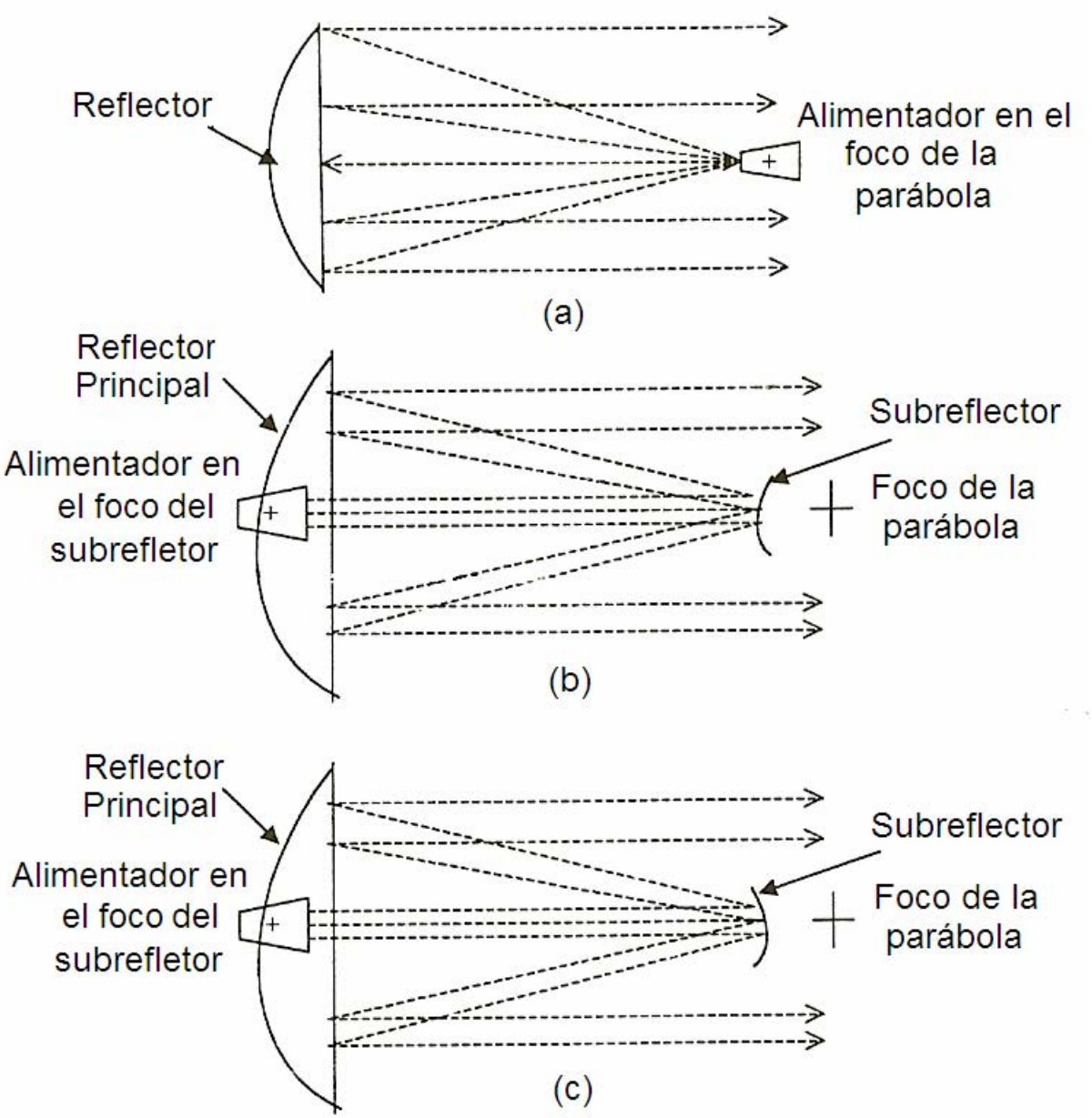


Figura 1.13 Antenas con alimentación en el foco: (a) antena parabólica (b) antena Cassegrain (c) antena Gregorian

Las antenas reflectoras o de lentes pueden tener solamente un alimentador figura 1.13 (a) o un alimentador y un subreflector como se muestra en las figuras 1.13 (b) y (c). Esta última configuración es muy utilizada en comunicaciones satelitales ya que puede generar un patrón multi-haz de una sola apertura óptica.

Los arreglos de antenas son diferentes tanto física como electrónicamente a las antenas reflectoras y de corneta. Los diseños que pueden tener estas antenas son circulares, rectangulares o hexagonales, como se muestra en las figuras 1.14(a), 1.14(b) y 1.14(c), respectivamente.

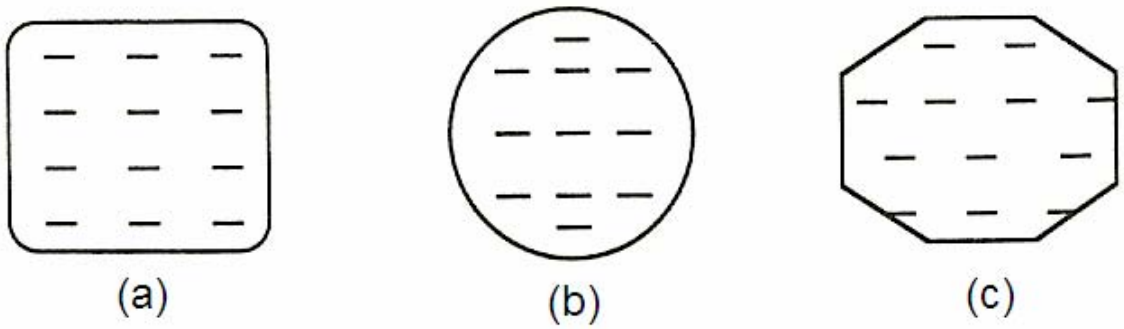


Figura 1.14 Arreglo de antenas: (a) circulares (b) rectangulares (c) hexagonales

Los arreglos de antenas tienen un gran número de transmisores y receptores en su superficie y a diferencia de otro tipo de antenas tienen eficiencia de apertura más alta, no hay bloqueo de alimentación, mayor confiabilidad y capacidad de satisfacer las necesidades específicas del área de cobertura.

El uso de estas antenas no ha sido tan acelerado debido principalmente a cuestiones económicas, aunque poco a poco sistemas satelitales comerciales ya están usando este tipo de antenas, como por ejemplo Globalstar.

1.2 Puesta en órbita de un satélite

Para poner en órbita un satélite hay que tomar en cuenta diversos factores como su peso, el ángulo de inclinación, la altura a la cual estará ubicado, y por consecuencia, la velocidad a la que tiene que orbitar.

Un satélite geoestacionario requiere estar a una altura de 35,786 km sobre el nivel del mar y requiere alcanzar una velocidad de 3.075 km/s para que permanezca en órbita geoestacionaria. Por lo general, este tipo de satélites son de gran tamaño y llegan a pesar varias toneladas, por lo que los lanzadores tienen que ser muy poderosos.

Los satélites de órbita baja son de menor tamaño y regularmente su peso es menor a una tonelada. Debido a esto, los lanzadores que se utilizan no requieren ser tan poderosos ni tan grandes, inclusive un sólo lanzador puede llevar varios satélites de órbita baja.

Sólo por mencionar algunos de los lanzadores más comunes para satélites geoestacionarios, están los Ariane, Delta y Titán; y para los satélites de órbita baja o intermedia están Athena, Tauro y Pegaso XL.

Para colocar un satélite en órbita geoestacionaria deben hacerse varios cambios de órbita y procurar gastar la menor energía posible. Gracias a los estudios que realizó Walter Hohman, se sabe que el camino más económico es usar una órbita elíptica conocida como órbita elíptica de transferencia u órbita de transferencia de Hohman.

El primer paso es colocar el satélite en una órbita circular baja y posteriormente encender un motor para pasar a la órbita elíptica, la cual debe ser tangente a la órbita circular y a la órbita final que será la geoestacionaria. Este proceso lo podemos ver simplificado en la figura 1.15 en donde se muestra que el punto tangente a la órbita

geoestacionaria se considera como el apogeo de la órbita elíptica y el perigeo es el punto tangente en la órbita circular.

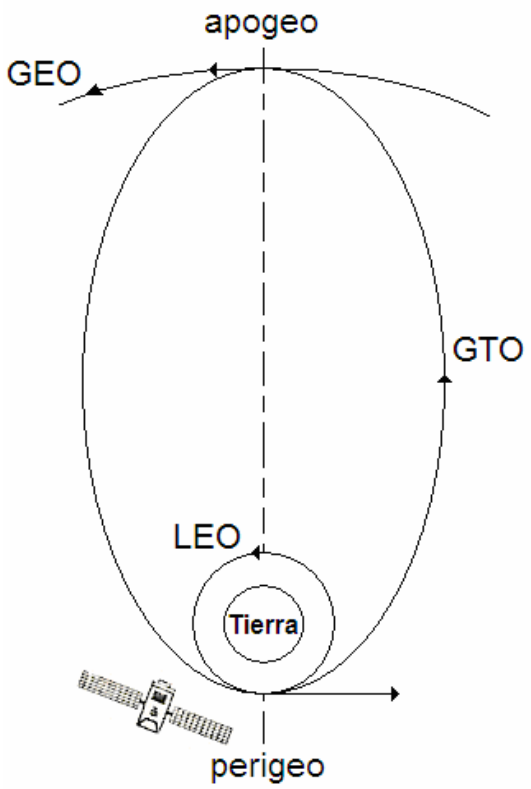


Figura 1.15 Orbita elíptica de transferencia

De acuerdo a la teoría de la dinámica orbital toda órbita elíptica tiene su propia energía mecánica formada por la energía potencial y la energía cinética. Tomando como referencia el semieje mayor *a* de la elipse representado en la figura 1.16, la energía mecánica[2] está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{\mu m}{r} = -\frac{\mu m}{2a} \qquad (1.2)$$

En donde,

m = representa la masa del satélite que orbita la Tierra

μ = constante de Kepler = 3.986×10^5 km^3 / s^2

[2] *Lutz, E., Werner,M., Jahn, A.,* ***Satellite Systems for Personal and Broadband Communications****, Springerg, 2000, pág 17*

a = longitud del semieje mayor de la elipse

r = radio del centro de la Tierra al satélite

v = velocidad del satélite

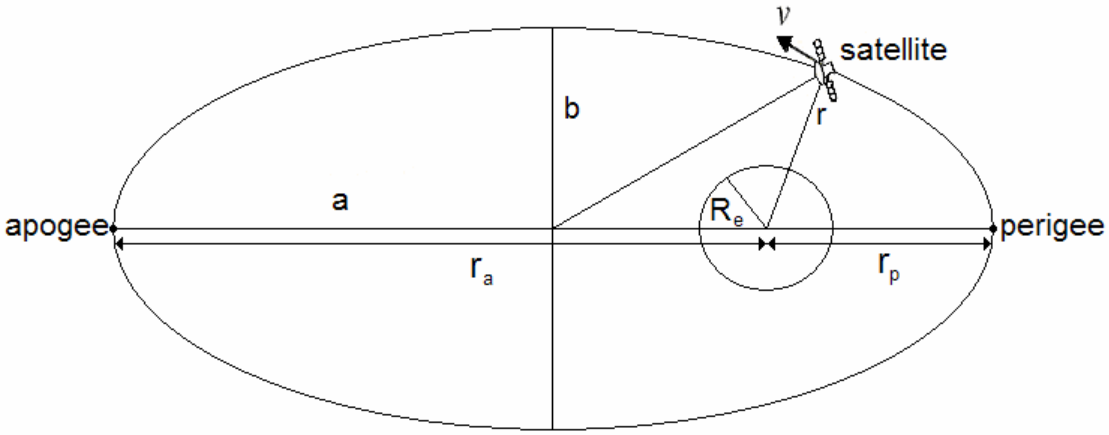


Figura 1.16 Representación de la órbita elíptica

Despejando la velocidad[3] v de la ecuación (1.2), se obtiene la velocidad del satélite en una órbita elíptica:

$$v = \sqrt{\mu\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)} \qquad (1.3)$$

Ahora, como se tiene un perigeo y un apogeo, las velocidades v_p[3] y v_a[3], velocidad de perigeo y apogeo respectivamente, se calcularán de la siguiente manera:

$$v_p = \sqrt{\frac{\mu r_a}{a r_p}} \qquad (1.4)$$

$$v_a = \sqrt{\frac{\mu r_p}{a r_a}} \qquad (1.5)$$

[3]*Sheriff, Ray E. & Fun Hu Y.,* ***Mobile Satellite Communication Networks****, John Wiley & Sons, 2001, pág 89*

En donde,

r_p = es el radio del centro de la Tierra al perigeo

r_a = es el radio del centro de la Tierra al apogeo

1.3 Clasificación de los satélites

Con el objetivo de poder entender mejor la teoría de los satélites, pueden clasificarse de la siguiente manera: por el uso que se les da, por la órbita en la que se encuentran ubicados, por el tipo de estabilización que utilizan, por el servicio que prestan y por la misión que tienen que cumplir.

1.3.1 Por su uso

Los satélites pueden ser utilizados para diferentes fines, entre los cuales podemos mencionar.

- **Satélites meteorológicos:** básicamente toman fotografías de la superficie de la Tierra; son utilizados para realizar investigaciones acerca de los cambios climáticos y el pronóstico del tiempo. Este tipo de satélites se encuentran principalmente en órbita baja, ya que por la cercanía a la Tierra se obtienen fotografías desde diferentes ángulos que no se podrían obtener desde una órbita más lejana.

- **Satélites militares:** este tipo de satélites son utilizados con el objetivo de resguardar la seguridad de algún país. A su vez, estos se clasifican en

  - **Satélites de alerta:** sirven para detectar algún tipo de proyectil que este invadiendo espacio aéreo no permitido.
  - **Satélites de vigilancia:** este tipo de satélites efectúan labores de reconocimiento a lo largo de un territorio en específico, y la información que recopilen es enviada a las estaciones terrenas correspondientes.

- **Satélites de telecomunicaciones:** se utilizan con la finalidad de crear redes de telecomunicaciones de alta seguridad y totalmente restringidas a civiles.
- **Satélites de localización:** ayudan a detectar la posición exacta de algún vehículo militar, como submarinos, aeronaves, barcos, etc.

- **Laboratorios de investigación espaciales:** su objetivo principal es experimentar con nuevas tecnologías, materiales y equipos para ser utilizados en los satélites.

- **Satélites de comunicaciones:** su función es captar las señales procedentes de las estaciones terrenas o de otros satélites y retransmitirlas hacia las estaciones receptoras. Existen dos tipos de satélites de comunicaciones: los activos y los pasivos. Los primeros sólo actúan como reflectores de la energía electromagnética, mientras que los segundos contienen la carga útil que el satélite necesita para realizar su función, como transpondedores, memorias, etc. Los satélites activos cuentan con una gran variedad de cobertura, estabilización, tecnología, potencia y vida útil.

- **Satélites para detección:** este tipo de satélites son utilizados para localizar de manera precisa coordenadas sobre la superficie terrestre, tal es el caso de los sistemas **GPS (*Global Positioning System*)**.

1.3.2 Por su órbita

Los satélites se encuentran a diferentes alturas con respecto a la superficie de la Tierra. Dependiendo de la altura a la que se encuentran es el tipo de órbita en la que se clasifican, que puede ser:

- **Satélites de Orbita Geoestacionaria (GEO)**
- **Satélites de Orbita Baja (LEO)**
- **Satélites de Orbita Media (MEO)**
- **Satélites de Orbita Elíptica (HEO)**

Satélites de Orbita Geoestacionaria (GEO)

Este tipo de satélites se encuentran a una altitud de 35 786 km aproximadamente por arriba del ecuador. Su período orbital está sincronizado con el de la Tierra (24 hrs.) por lo que dan la apariencia de estar fijos en el cielo. También son llamados geosíncronos o simplemente geosatélites.

Por la altitud a la que se encuentran, con sólo tres satélites de este tipo se puede tener cobertura global, con excepción de las regiones polares, ya que el movimiento de los satélites es de este a oeste y no de norte a sur. Sin embargo, debido a las largas distancias que recorren las señales de satélites geoestacionarios, la atenuación que se tiene es muy alta y el retraso de propagación es de 0.5 s desde una estación terrena a otra y de regreso, que puede llegar a ser muy significativo, por ejemplo, en una conversación telefónica.

Satélites de Orbita Baja (LEO)

Reciben este nombre por que se encuentran a una altitud que oscila entre 750 - 2000 km sobre la superficie de la Tierra. Debido a esto, se evita la atenuación y el retraso de tiempo en la señal que se presentan en las señales de los satélites que se encuentran en órbita geoestacionaria. Sin embargo, se requiere de un gran número de satélites para cubrir la superficie de la Tierra.

Los satélites de órbita baja, a diferencia de los satélites geoestacionarios, tienen menos peso y son menos complejos. Su período orbital es de aproximadamente 2 hrs. y, como consecuencia, un satélite transporta mensajes en tiempo no real, almacenando y enviando (***store-and-forward***) la información correspondiente. Por otro lado, en conexiones tiempo real, puede llegar a ser necesario cambiar hacia otro satélite.

Las órbitas de estos satélites tienen diferentes inclinaciones con respecto al ecuador, inclusive pueden tener trayectorias polares, que es un caso particular de la órbita baja y que se explicará a detalle más adelante.

Satélites de Orbita Media (MEO)

Este tipo de satélites se encuentran a una altitud entre 10 000-20 000 km. Su período orbital es de aproximadamente 6 hrs. La atenuación y el retraso en la señal es un poco mayor a la que presentan los satélites de órbita baja, sin embargo, se puede tener cobertura global con un menor número de satélites (entre 10 y 15). De igual manera, los niveles de potencia usados son mayores. Esta órbita es utilizada por los sistemas de navegación ***GPS*** (**Global Positioning System**) y ***GLONASS***.

Satélites de Orbita Elíptica (HEO)

Debido a la forma de este tipo de órbita, se puede hablar de un apogeo (punto más lejano a la Tierra) aproximadamente de 40 000-50 000 km de altitud, y un perigeo (punto más cercano a la Tierra) aproximadamente de 1000-20000 km de altitud y no necesariamente por arriba del ecuador, se pueden tener diferentes ángulos de inclinación con respecto a este. Se requieren tres o cuatro satélites para proveer una cobertura continua en una región.

Su período orbital es de 12 hrs. aproximadamente. Los satélites que se encuentran en esta órbita están diseñados para tener un ángulo de elevación muy alto para cubrir latitudes en la parte norte y sur de la Tierra. Un ejemplo de un sistema satelital que utiliza la órbita elíptica es el sistema ruso ***Molniya***.

1.3.3 Por su estabilización

Los satélites están expuestos a diferentes fuerzas que pueden modificar su posición orbital. Algunas de ellas son ejercidas por el Sol, la Luna y la misma fuerza de atracción de la Tierra. Como consecuencia, el satélite sale de la posición que le fue asignada y se modifica el apuntamiento hacia la Tierra.

Existen dos maneras de mantener al satélite estable, es decir, en correcta orientación con respecto a la Tierra, y son la **estabilización por giro** y la **estabilización triaxial.**

Los satélites de forma cilíndrica son los que utilizan la estabilización por giro y están, casi en la totalidad de su superficie, cubiertos con celdas solares. Este tipo de satélites giran sobre su propio eje para mantener el equilibrio que requiere toda la estructura. La parte del satélite en donde se encuentran las antenas permanece fija en dirección a la Tierra y el resto de la estructura gira. En la figura 1.17 se muestra un ejemplo de un satélite que utiliza la estabilización por giro.

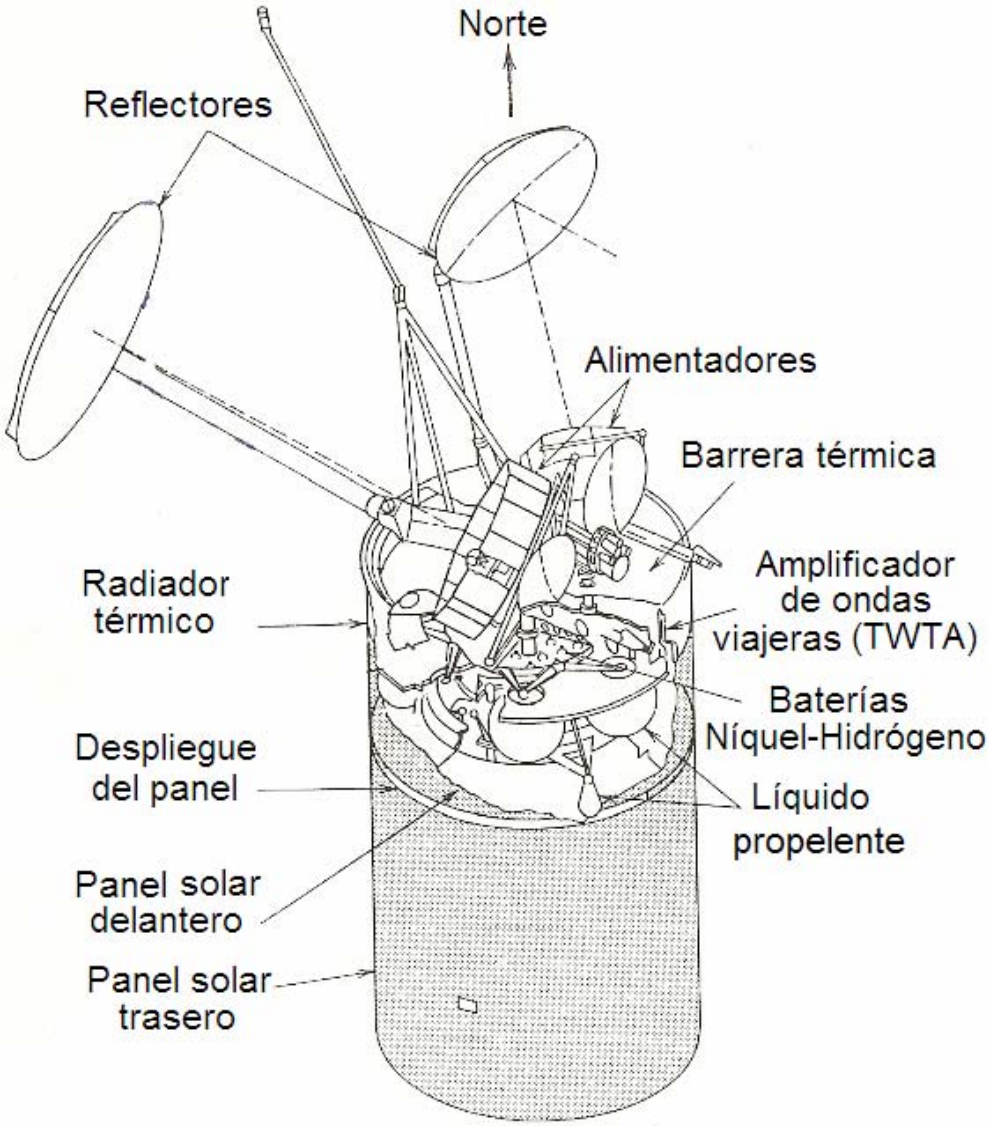


Figura 1.17 Satélite que utiliza estabilización por giro

Los satélites que usan la estabilización triaxial no giran. En su interior cuentan con volantes giratorios sobre cada uno de los ejes que se toman como referencia para su orientación. Los paneles solares, a diferencia de los mencionados anteriormente, se encuentran en dos de sus costados y son plegables. A continuación se muestra la figura 1.18 un satélite que utiliza estabilización triaxial.

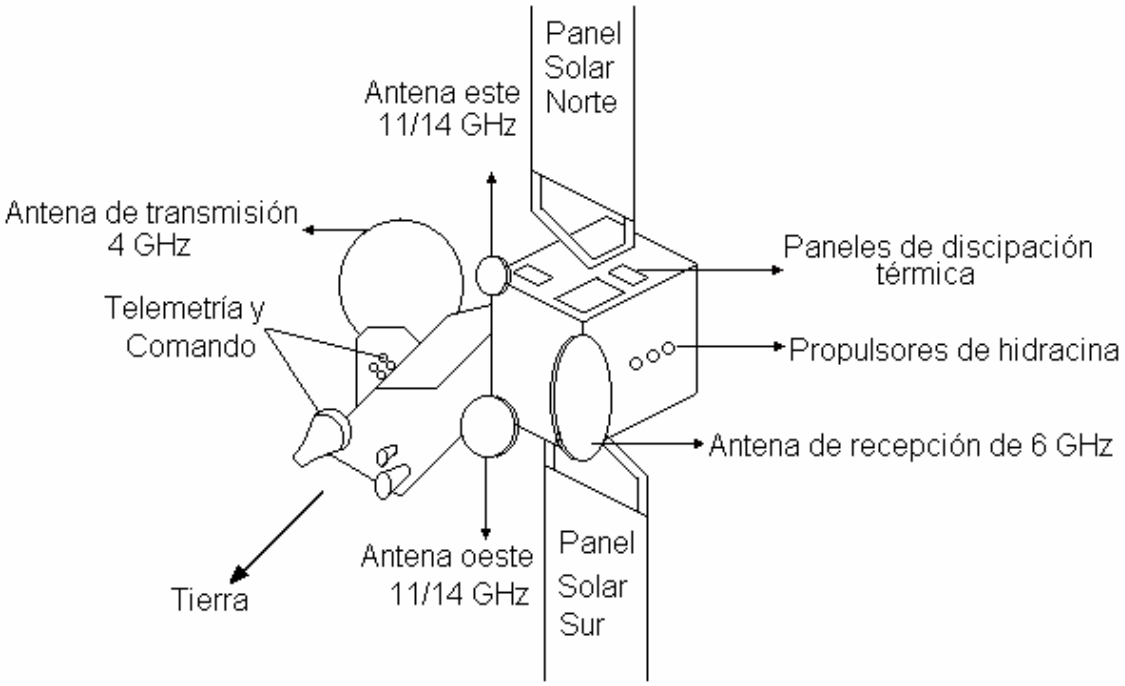


Figura 1.18 Satélite que utiliza estabilización triaxial

1.3.4 Por su misión

Se refiere a las bandas que utilizan los satélites, ya que no todos operan a la misma frecuencia. Los sistemas de comunicaciones vía satélite dependen de la disponibilidad del espectro electromagnético, por lo que, las bandas dentro de las cuales operan son:

- Transmisión de datos (“little-LEO’s”): VHF y UHF alrededor de 150 - 400 MHz.
- Transmisión de voz (“big-LEO’s”, como Iridium y Globalstar): L y S en el rango de 1.610 - 1.6265 GHz y 2.4835 - 2.500 GHz para enlaces de subida y bajada respectivamente.

Las frecuencias localizadas entre 1.6138 - 1.6265 GHz se utilizan tanto para enlaces de subida como de bajada, tal es el caso de Iridium. En la banda L las frecuencias localizadas entre 1.525 - 1.559 GHz (bajada) y de 1.6265 - 1.6605 GHz (subida) están destinadas a los sistemas satelitales geoestacionarios.

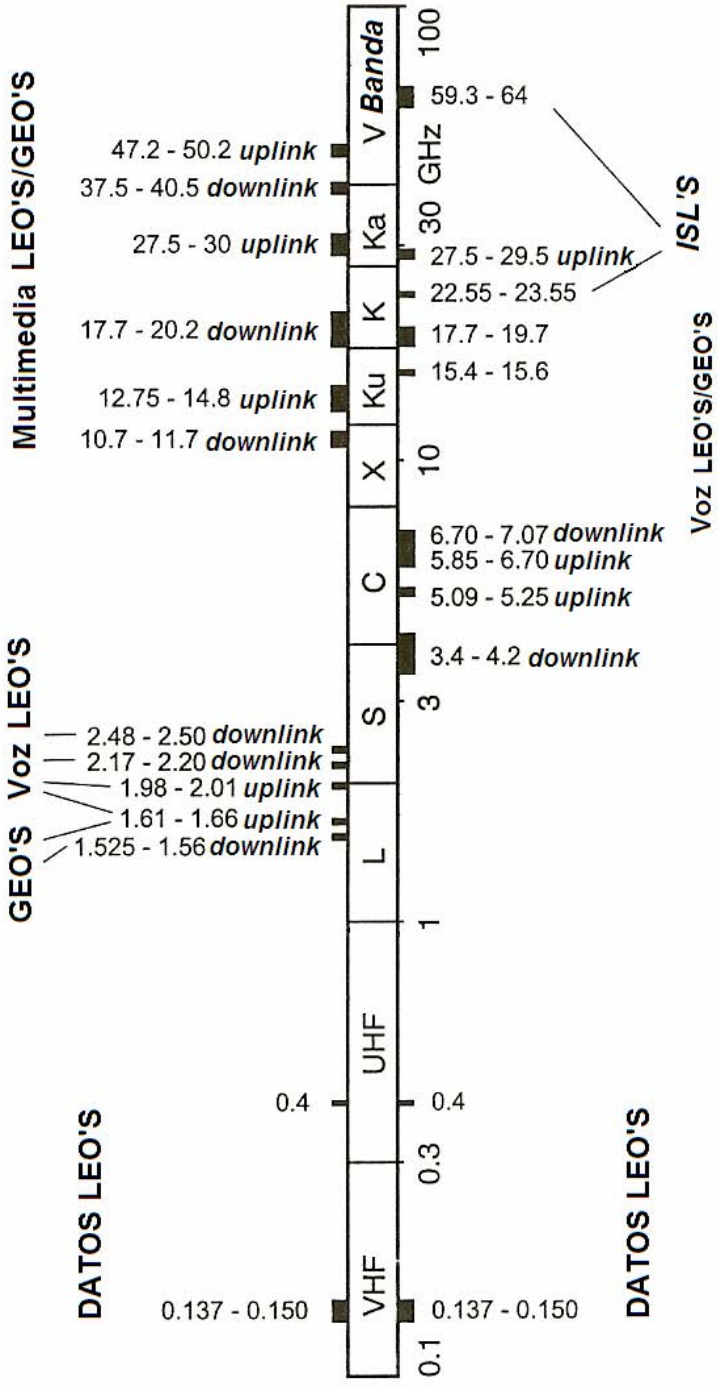


Figura 1.19 Asignación de frecuencias

Para la transmisión de video, Internet de alta velocidad y multimedia los sistemas satelitales deben proporcionar altas velocidades para la transmisión de datos para los enlaces de subida y bajada, del orden de Mb/s, por lo que se requieren frecuencias de banda ancha del orden de 10 GHz. Los sistemas satelitales multimedia usan frecuencias entre 11/14 GHz (banda Ku), 20/30 GHz (bandas K/Ka) o inclusive 40/50 GHz (banda V, también llamada banda EHF).

Las frecuencias que se encuentran en los rangos de 4/7 GHz, 15 GHz y 20/30 GHz se utilizan para los enlaces entre satélites y estaciones terrenas fijas. En la figura 1.19 se muestra un esquema de las bandas de frecuencia que se utilizan en comunicaciones satelitales.

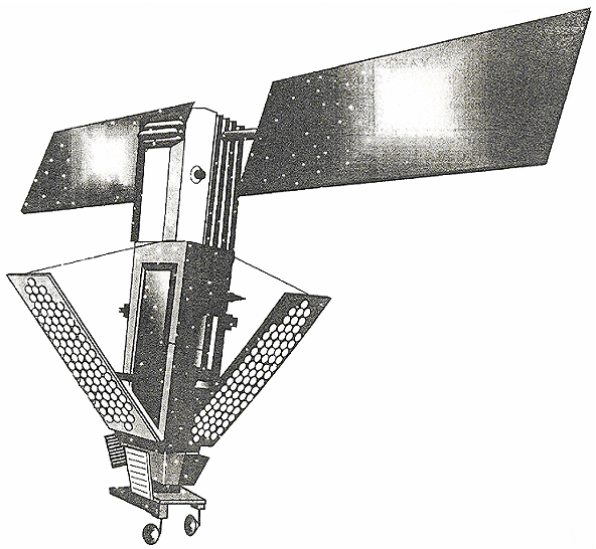
1.3.5 Por su servicio

Son muchos los servicios que pueden proporcionar los satélites, dependiendo del sistema al cual pertenecen. El sistema **INTELSAT** (***International Telecommunications Satellite Organization***), por ejemplo, cuenta con una red de 20 satélites geoestacionarios y proporciona servicios de telefonía, televisión, telex, videoconferencias, correo electrónico, transmisión de datos e Internet. Otro sistema importante es **EUTELSAT** (***European Telecommunications Satellite Organization***) que ofrece servicios de telefonía, telegrafía, transmisión de datos y televisión. Este sistema cuenta con 18 satélites geoestacionarios.

El sistema internacional **INMARSAT** (***International Maritime Satellite Organization***) proporciona servicios de telefonía y transmisión de datos a embarcaciones y plataformas marítimas, así como servicios de fax, telefonía y transmisión de datos a barcos, aviones, vehículos terrestres y terminales portátiles; y el sistema **GPS (*Global Positioning System*)** que proporciona servicios de localización global con una precisión de hasta 16m para uso militar y menos de 100 m para civiles. Estos son sólo algunos de los sistemas satélites importantes que prestan diferentes servicios. Son muchos los países que pertenecen a estos sistemas, algunos de los cuales pagan por estos servicios, ya que no cuentan con sus propios satélites.

CAPÍTULO II

SATÉLITES DE ÓRBITA BAJA



2.1 Primeros lanzamientos de satélites de órbita baja

El primer lanzamiento de un satélite de órbita baja fue en 1957 en Rusia y su nombre fue ***Sputnik*** y estuvo en órbita durante 21 días transmitiendo información de telemetría. De hecho, fue el primer satélite puesto en órbita. Muchos fueron los lanzamientos que siguieron, principalmente satélites destinados a permanecer en órbita geoestacionaria.

Con el paso del tiempo, muchas fueron las investigaciones que se llevaron a cabo con el fin de mejorar la manera en la que se explota el espacio y aprovechar las grandes ventajas que proporciona la utilización de otro tipo de órbitas y, como consecuencia, poder proporcionar más servicios a través de la comunicación satelital.

Es importante hacer notar que como la órbita geoestacionaria está muy saturada, es decir, como es una órbita que brinda muchas ventajas, la mayoría de los sistemas satelitales la utilizan. Es por eso que tuvo que pensarse en otra opción y es así como surgen los satélites no-geoestacionarios.

De los primeros sistemas que existieron y que se consideran pioneros podemos mencionar a **IRIDIUM** y **ORBCOMM**. Ambos fueron de las primeras constelaciones en entrar en operación en órbita baja (750-2000 km) ofreciendo servicios de transmisión de datos y telefonía. Dentro de los satélites no-geoestacionarios también podemos mencionar los de órbita media (**MEO**, ***Medium Earth Orbit***) que principalmente brindan servicios de localización (**GPS**, ***Global Positioning System***).

Hablando de servicios de bada ancha, una de las constelaciones que se mantiene a la vanguardia es **TELEDESIC**, cuyo objetivo es tener un sistema de telecomunicaciones que actúe como si se estuviera utilizando un acceso con fibra óptica, en el cual las pérdidas y los retrasos en tiempo real sean minimizados al máximo.

Dentro de los satélites de órbita baja se encuentra una categoría conocida como microsatélites, los cuales son de gran utilidad. Reciben este nombre porque su tamaño es pequeño comparado con otros satélites de órbita baja. Su peso es aproximadamente de 10-100 kg. Un ejemplo de estos es la constelación conocida como ***DMC (Disaster Monitoring Constellation)***, que en la actualidad cuenta con 5 microsatélites en órbita, aproximadamente a 686 km de altitud.

El objetivo de esta constelación es el constante monitoreo la superficie de la Tierra, y proveer imágenes diarias de la misma, ya sea para conseguir fotografías de algún desastre natural acontecido, como: incendios, inundaciones, la erupción de un volcán o simplemente para recopilar información útil en el diseño de mapas hidrográficos u orográficos. Otra de las aplicaciones es el monitoreo de la deforestación que sufre la Tierra día tras día.

Los países que están involucrados en este proyecto son: Argelia, Turquía, Nigeria, Inglaterra y China, los cuales cuentan con un microsatélite cada uno dentro de esta constelación: Alsat-1 (2002), Bilsat-1 (2003), Nigeriasat-1 (2003), UK-DMC (2003) y Beijing-1 (2005), respectivamente. En la figura 2.1 se muestra un ejemplo del diseño de estos satélites.

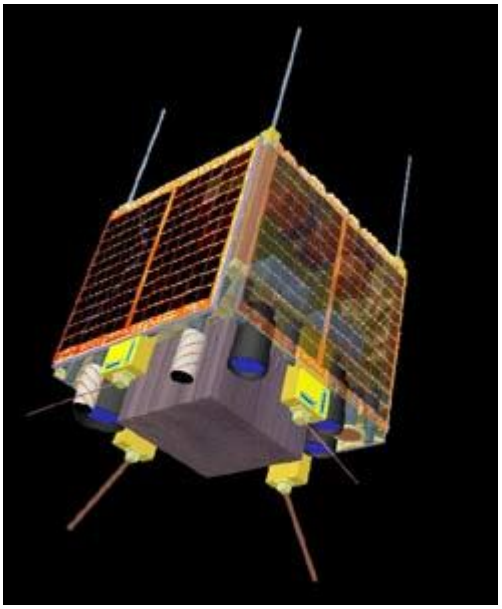


Figura 2.1 Diseño de un microsatélite DMC

En los próximos capítulos se explicarán las características de los satélites de órbita baja, los servicios que proporcionan y las ventajas y desventajas de los mismos. En la tabla 2.1 se muestran algunas características generales de los satélites de órbita baja.

Tabla 2.1 Características generales de los satélites de órbita baja

Sistema	Operador	Fabricante	Satélites	Masa (lb)	Orbita	Lanzamiento	Estatus
BIG LEO							
Ellipso	Mobile Comm.	Spectrum Astro	18+4	1550	MEO	2000	Activo
Goblalstar	Loral Qualcomm	Alenia Spazio	48+8	985	LEO	1997	Activo
ICO	ICO Global	Hughes	10+2	6050	MEO	1998	Activo
Iridium	Motorota	Lockheed Martin	66+6	1500	LEO	1997	Activo
Odyssey	TRW	TRW	12+3	4880	MEO	2000	Activo
LITTLE LEO							
Orbcomm	Orbital Comm.	Orbital Sciences	28+0	95	LEO	1995	Activo
LEO One	LEO One USA	TBD	40+0	275	LEO	2000	Activo

Tabla 2.2 Pronóstico de crecimiento de los satélites de órbita baja

Tamaño del vehículo espacial	1999-2000	2001-2002	2003-2004	2005-2006
Pequeños lanzadores	8 a 11 por año	13 a 17 por año	8 a 11 por año	10- 14 por año
Grandes lanzadores	9 a 12 por año	2 a 4 por año	11 a 14 por año	4 a 6 por año
Lanzamientos proyectados en total	36 a 46	30 a 42	38 a 50	28 a 40

En los próximos años se espera que la demanda de los satélites de órbita baja incremente debido a los diferentes servicios que proporcionan, aunado a las ventajas que proporciona con respecto a otro tipo de satélites. Basándose en la información obtenida de la Administración Federal de Aviación (***FAA***, ***Federal Aviation Administration,*** por sus

siglas en inglés), se presentan en la tabla 2.2 algunas de las expectativas y el pronóstico de crecimiento de este tipo de satélites

2.2 Lanzamientos no exitosos

Muchos han sido los intentos que se han realizado por mejorar constantemente la tecnología utilizada por el hombre para su beneficio. Algunos de estos intentos, sin embargo, no han sido exitosos debido a distintas circunstancias y factores que afectaron en su momento a los mismos.

El campo de las telecomunicaciones satelitales no ha sido la excepción. Los diseños de los satélites han evolucionado con el paso de los años. En un principio sólo la órbita geoestacionaria era la única utilizada y conforme fueron realizadas investigaciones, fueron descubiertas distintas maneras de expandir y mantener comunicación con otras partes del mundo, sin ocupar solamente esta órbita. Este es el caso de los satélites que se encuentran en órbitas no-geoestacionarias, como la órbita polar, órbita baja u órbita media.

En la tabla 2.3 se muestran algunos satélites de órbita baja que por diversas circunstancias y factores han sido removidos y reemplazados.

Tabla 2.3 Cronología de fallas de satélites de órbita baja

SATELITE	FECHA DE LANZAMIENTO	AÑO DE FALLA
IRIDIUM 21	JULIO 1997	JULIO 1997
IRIDIUM 27	SEPTIEMBRE 1997	OCTUBRE 1997
IRIDIUM 24	DICIEMBRE 1997	MAYO 1998
IRIDIUM 79	SEPTIEMBRE 1998	NOVIEMBRE 2000
IRIDIUM 14	JUNIO 1997	SEPTIEMBRE 1997
IRIDIUM 48	DICIEMBRE 1997	MAYO 2001
IRIDIUM 38	SEPTIEMBRE 1997	JUNIO 2003

En la actualidad, los últimos reportes de cambios en el sistema Iridium son los siguientes:

- En septiembre del 2003 Iridium 38 fue reemplazado por Iridium 82
- En abril del 2005 Iridium 16 fue reemplazado por Iridium 86
- En agosto del 2005 Iridium 17 fue reemplazado por Iridium 77

A continuación se dará una breve explicación de algunos de los lanzadores más importantes que colocan satélites en órbita polar. En primer lugar mencionaré un vehículo espacial desarrollado por la India que permite transportar carga útil de hasta una tonelada. Se trata del PSLV, que permitió a la India lanzar su primer satélite llamado IRS (*India Resource Satellite*) y de esta manera no depender de los vehículos espaciales rusos que proporcionan este tipo de servicios.

Después de varias pruebas, el PSLV fue lanzado por primera vez en septiembre de 1993 y desde entonces ha ayudado a poner en órbita distintos satélites, entre los cuales podemos mencionar IRS-P4 (*OCEANSAT*), el satélite coreano llamado KITSAT y el alemán TUBSAT en mayo de 1999. Posteriormente, un triple lanzamiento se dio lugar en el 2001 cuando el PSLV-3C exitosamente puso en órbita los satélites BIRD de Alemania, PROBA de Bélgica y TES de la India.

En segundo lugar, el lanzador Titán, que hasta la fecha se mantiene como uno de los vehículos de lanzamiento más solicitados y confiables en el mercado. Titán ha evolucionado con el paso de los años desde 1959 cuando se probó por primera vez, hasta la actualidad. Son varias las versiones que han existido de este vehículo y las más recientes son el Titán IVA y Titán IVB. En la figura 2.2 se muestra una fotografía del Titán IVB.

La capacidad para llevar carga útil de estos lanzadores se ha incrementado en un 25%, los cohetes utilizados presentan incremento en la potencia y también en sus dimensiones. La carga útil que puede llevar este vehículo a la órbita baja es 22,200 kg y básicamente es utilizado para misiones militares, por ejemplo para el Departamento de

Defensa de los Estados Unidos de América. En la tabla 2.4 se muestran algunas de las características más importantes de las distintas versiones que se han desarrollado del Titán.

Figura 2.2 Titán IVB

Tabla 2.4 Características principales del vehículo espacial Titán

Versión del Titán	Longitud máx. (m)	Diámetro máx. (m)	Carga útil (kg)
I	31	3.1	-
II	36	3.1	3,100
IIIA	42	3.1	3,100
IIIB	45	3.1	3,300
IVA	51	4.3	17,740
IVB	62	5.1	21,680

2.3 Orbita polar

La órbita polar es un tipo de órbita baja que, como su nombre lo indica, los satélites aquí localizados viajan en dirección norte-sur, a diferencia de la dirección este-oeste que la mayoría de los otros sistemas utilizan. En la figura 2.3 se muestra el ejemplo de un satélite ubicado en órbita polar.

Figura 2.3 Satélite en órbita polar

La razón por la cual se utiliza éste tipo de órbita es porque resulta muy útil para poder obtener una mejor perspectiva y, por lo tanto, mejores imágenes de la superficie de la Tierra. Mientras el satélite se encuentra orbitando en dirección norte-sur, la Tierra gira en dirección este-oeste y como resultado, el satélite puede escanear toda la superficie de la Tierra, una "franja" a la vez hasta cubrir todo el planeta, como se muestra en la figura 2.4.

Este tipo de órbita es muy útil para los satélites que realizan operaciones de monitoreo, "mapeo" y vigilancia sobre la Tierra, tal es el caso de los sistemas ***NOAA* (*The National Oceanic and Atmospheric Administration*)**, ***Tiros*** y ***Landsat***. Como el plano orbital normalmente permanece fijo, el planeta rota debajo de la orbita polar permitiendo al satélite acceso a baja altitud virtualmente a cada punto de la superficie.

Para poder lograr que un satélite llegue a la órbita polar se requiere más energía, es decir, más propelente que el necesario para poner un satélite en órbita baja con cierta inclinación. El vehículo espacial utilizado debe proveer toda la energía necesaria para alcanzar la velocidad orbital.

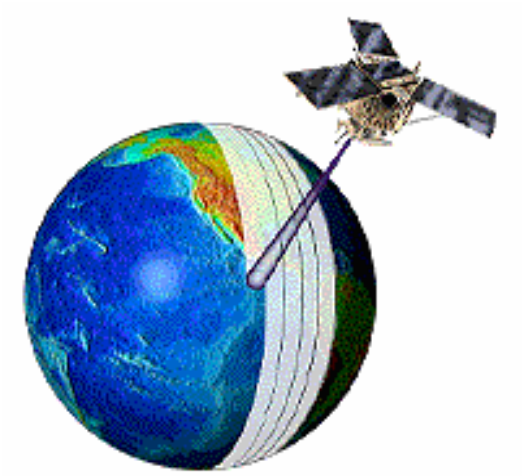


Figura 2.4 Escaneo de la superficie de la Tierra

Los satélites meteorológicos y los que se encargan de realizar monitoreos del medio ambiente global, son los que se encuentran en órbitas polares, que tienen un ángulo de inclinación de 90°, el cual es perpendicular a una línea imaginaria que se localiza en el ecuador, como lo muestra la figura 2.5 a continuación.

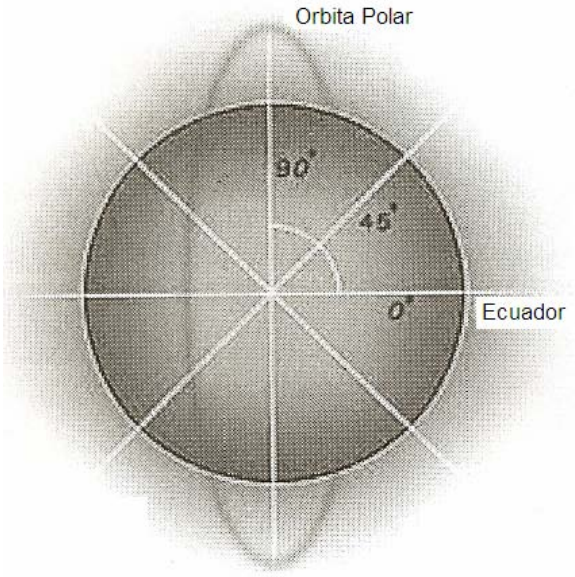


Figura 2.5 Ángulo de inclinación de la órbita polar

2.4 Satélites *"little LEO"*

Este tipo de satélites se utilizan principalmente para monitoreo remoto y servicios de mensajes, incluyendo correo electrónico. Se encuentran ubicados entre 700 y 2000 km sobre la superficie de la Tierra, por lo que, se puede decir que los servicios operan en tiempo cercano al real, aunque puede que también trabajen en el modo ***store-and-forward***, dependiendo del grado de cobertura de la red disponible de cada sistema.

El modo ***store-and-forward*** funciona de la siguiente manera, el satélite recibe información de alguna estación terrena, la "guarda" en una memoria que se encuentra a bordo del satélite para su posterior "liberación" en la estación terrena apropiada o usuario.

Esto es determinado por la constelación satelital y la infraestructura terrestre con la que se cuente para realizar el soporte de dicha constelación. Por ejemplo, puede ocurrir que un satélite descargue la información que lleva sólo cuando pase sobre determinada área de cobertura, misma en donde se encuentra el ***gateway*** que está conectado con la infraestructura terrestre de la red.

El término "***little LEO***" se debe a que en comparación con otros satélites que se encuentran en órbita baja, su diseño es más pequeño y menos complejo, esto es, aproximadamente miden un metro cúbico y pesan alrededor de 100-500 kg. Estos satélites se mueven en relación a un punto fijo que se encuentra localizado en la superficie de la Tierra y debido a su diseño no proveen servicios ***PCN*** (***Personal Communication Network***).

Los usuarios podrán tener acceso a los sistemas "***little leo***" por medio de dispositivos que son de fácil manejo y que caben en la mano, los cuales tienen una antena de baja potencia omnidireccional. Ahora la pregunta es ¿por qué utilizar este tipo de satélites? ¿Qué los hace diferentes? Bueno, la respuesta es que, a diferencia de otros sistemas de satélites móviles, los "***little leo***" se concentran en proveer servicios de datos, en lugar de tráfico de voz en tiempo real.

Los tipos de servicios que se pueden esperar de este tipo de satélites son: mensajes, *paging*, acceso limitado a Internet y fax. Mercados importantes para estos satélites son: comunicación de datos remota, rastreo digital (mercado de transportación), monitoreo del ambiente y en el sistema **SCADA** (***Supervisory Control and Date Acquisition)*** que es un sistema que provee monitoreo remoto de instalaciones aisladas como minas, refinerías de petróleo, etc.

El futuro se ve brillante para los sistemas "***little LEO***" aunque es importante hacer notar que el espacio asignado en el espectro electromagnético para este tipo de sistemas es reducido y los operadores esperan que la **UIT** (***Unión Internacional de Telecomunicaciones, ITU*** por sus siglas en inglés) permita el incremento dentro del espectro en el rango de frecuencias de 1 GHz. Será cuestión de tiempo para obtener esta aprobación y mientras tanto los operadores seguirán insistiendo hasta obtener el incremento deseado.

Esta situación de ninguna manera desanima a los promotores de este tipo de sistemas satelitales, por el contrario, los alienta a seguir adelante insistiendo y dando a conocer los beneficios de los satélites "***little LEO***" y encontrarán un nicho importante en la nueva era de la información.

Un punto que es muy importante en las telecomunicaciones es la regulación de las mismas. En Estados Unidos la ***FCC*** (***Federal Communications Comission***) es la encargada de otorgar las licencias correspondientes para proveer los servicios en determinadas frecuencias. En 1990 solicitaron licencias **ORBCOMM** (***Orbital Services Corporation***), STARSYS y **VITA** (***Volunteers in Technical Assistance***).

En la tabla 2.5 se muestran las frecuencias de operación asignadas por la **ITU** (***International Telecommunications Union***) que son bandas de frecuencia compartidas en estatus primario o secundario, lo que quiere decir que los servicios en estatus primario no se verán afectados por servicios en estatus secundario. Si uno o más servicios en estatus

primario están dentro de una banda en común, los operadores se deben coordinar para que las transmisiones no causen interferencia mutua.

Tabla 2.5 Frecuencias asignadas para "little LEO´s" menores a 500 MHz

Frecuencia (MHz)	Estatus	Dirección
137-137.025	Primario	Espacio-Tierra
137.025-137.175	Secundario satélite meteorológico	Espacio-Tierra
137.175-137.825	Primario	Espacio-Tierra
137.825-138	Secundario satélite meteorológico	Espacio-Tierra
148-148.9	Primario	Tierra-Espacio
149.9-150.05	Primario	Enlace de subida
312-315	Secundario	Enlace de subida
387-390	Secundario	Espacio-Tierra
399-400.05	Primario	Tierra-Espacio
400.15-401	Primario	Espacio-Tierra
406-406.1	Primario	Tierra-Espacio

En 1994 la FCC otorgó la licencia a **ORBCOMM** para operar 36 satélites en una banda de frecuencias comprendida entre 148 y 150.5 MHz en transmisión y 400.15 y 401 MHz en recepción. Esta constelación tuvo un costo aproximado de 320 millones de dólares, proporcionando servicios de *paging* y correo electrónico. En la figura 2.6 se muestra el diseño de un satélite **ORBCOMM**.

Un año después, la licencia se le otorgó a **VITA** para operar dos satélites en las frecuencias comprendidas entre 149.8 y 149.9 MHz en transmisión y 400.15 y 401 MHz en recepción, con un costo aproximado de 10 millones de dólares, ofreciendo principalmente servicio de mensajes.

Por último, **STARSYS** recibió su licencia para operar 24 satélites con frecuencias de transmisión entre 148 y 150.05 MHz y para la recepción entre 400.15 y 401 MHz con un costo aproximado de 320 millones de dólares y ofreciendo servicio de mensajes. **ORBCOMM** se convirtió en la primera constelación satelital de órbita baja en operar comercialmente en 1998.

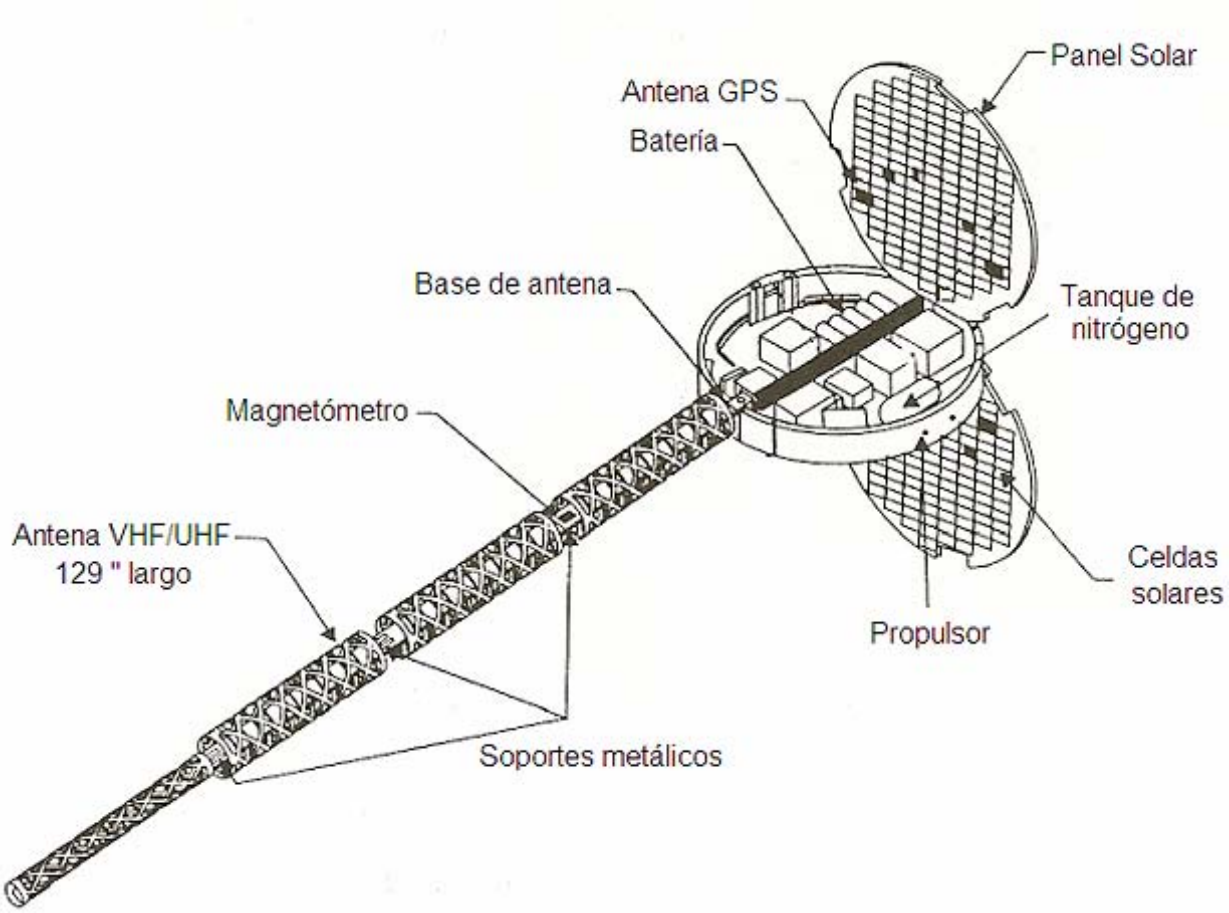


Figura 2.6 Satélite ORBCOMM

2.5 Satélites "*big LEO*"

Este tipo de satélites se encuentran ubicados entre 750 a 2000 km sobre la superficie de la Tierra y su tiempo de órbita es aproximadamente 90 minutos. Su vida útil es de 5 a 7 años. Los satélites "***big LEO***" principalmente proveen servicios **SPCN** (***Satellite Personal Communications Network***) se utilizan las bandas de frecuencia **L** y **S** que se muestran en la tabla 2.6. En esta misma tabla se hace referencia a las regiones de operación que según la **ITU** son: región 1 América; región 2 Europa, África y la antigua Unión Soviética; región 3 Australasia.

Tabla 2.6 Frecuencias en las bandas L y S

Frecuencia (MHz)	Estatus	Dirección	Región
1492-1525	Primario	Espacio-Tierra	Región 2
1525-1530	Primario	Espacio-Tierra	Región 2/Región 3
1610-1626.5	Primario	Tierra-Espacio	Mundial
1613.8-1626.5	Secundario	Espacio-Tierra	Mundial
1626.5-1631.5	Primario	Tierra-Espacio	Región 2/Región 3
1675-1710	Primario	Tierra-Espacio	Región 2
1930-1970	Secundario	Tierra-Espacio	Región 2
1970-1980	Primario	Tierra-Espacio	Región 2
1980-2010	Primario	Tierra-Espacio	Mundial
2120-2160	Secundario	Espacio-Tierra	Región 2
2160-2170	Primario	Espacio-Tierra	Región 2
2170-2200	Primario	Espacio-Tierra	Mundial
2483.5-2500	Primario	Espacio-Tierra	Mundial
2500-2520	Primario	Espacio-Tierra	Mundial
2670-2690	Primario	Tierra-Espacio	Mundial

El número de satélites en una constelación depende de la altitud a la que se encuentre y las características de disponibilidad del servicio. Las constelaciones de este tipo brindan servicio sólo a terminales personales satelitales, aunque se están incorporando teléfonos en modo dual, es decir, teléfonos que pueden usar un enlace satelital cuando el enlace terrestre no esté disponible. Ejemplo de este tipo de teléfonos son los que utilizan la tecnología **GSM (*Global System for Mobile Telecommunications*)**. Dos de los sistemas satélites más importantes considerados como "***big LEO***" son **IRIDIUM** y **GLOBALSTAR** que más adelante serán descritos. En la figura 2.7 se muestra un ejemplo de un satélite de la constelación **IRIDIUM** con los paneles solares.

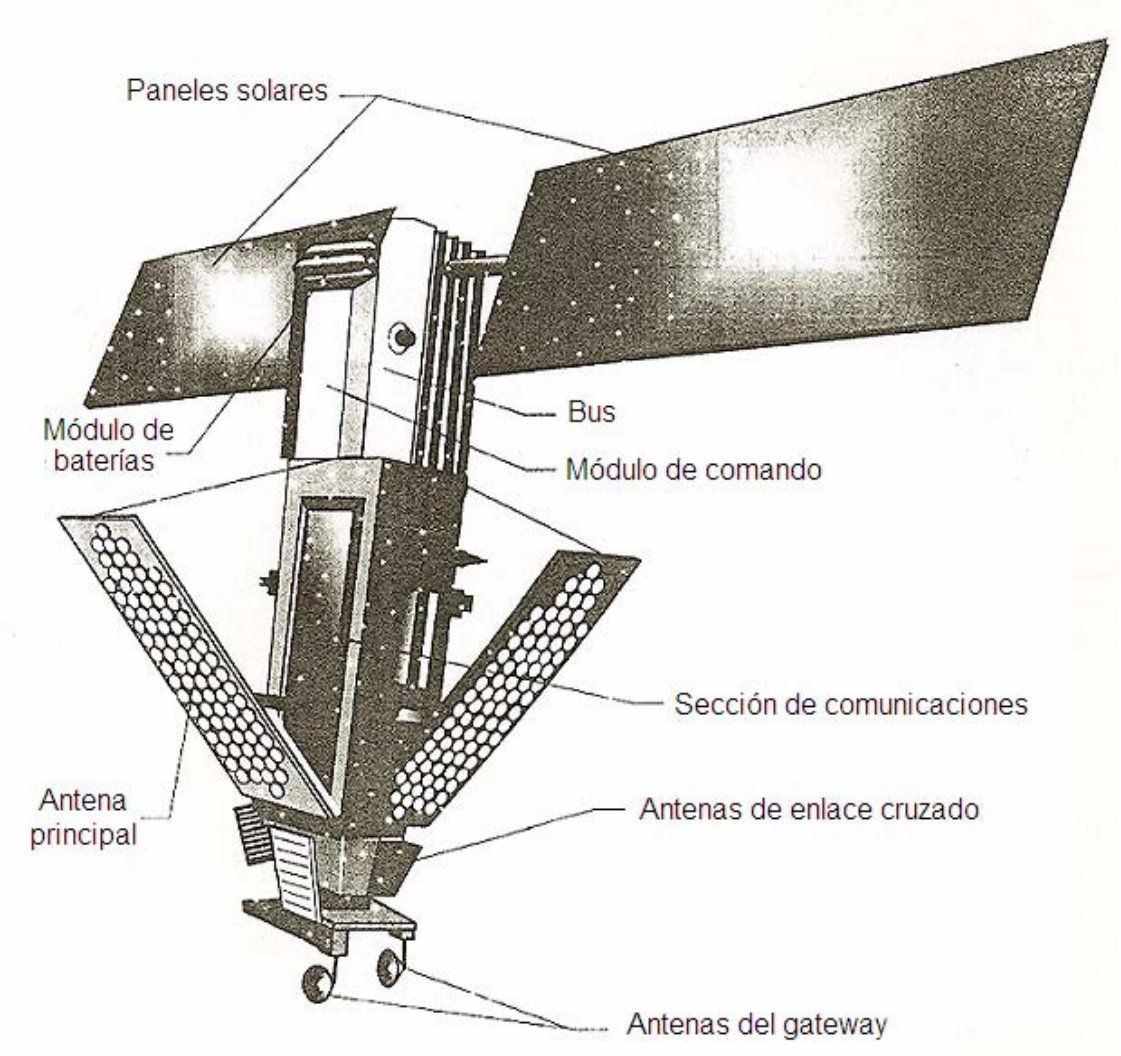


Figura 2.7 Satélite IRIDIUM

A continuación se presentan unas tablas comparativas entre los sistemas "***big leo***" más importantes.

Tabla 2.7 Servicios y costos

	Odyssey	**ICO**	**Globalstar**	**Iridium**	**Teledesic**	**Ellipso**
Tipos de servicio	Voz, datos, fax, mensajes, localización de posición	Voz, datos, fax,	Voz, datos, fax, mensajes cortos, localización de posición	Voz, datos, fax, mensajes, localiza-ción de posición	Voz, datos, fax, vídeo	Voz, datos, fax, mensajes, localiza-ción de posición
Voz (kbps)	4.8	4.8	Adaptable 2.4 / 4.8 / 9.6	2.4	16	4.15
Datos (kbps)	9.6	2.4	7.2	2.4	16 - 2048	0.3 - 9.6
Modula-ción	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	--	OQPSK
Circuitos de voz/ satélite	2300	4500	2000-3000	1100	100000 canales 16 kbps	--
Modo dual terminal de usuario	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Terminales usuario manejables	Sí	Sí	Sí	Sí	Portátil	Sí
Costo sistema (US$)	1800	2600	2000	3700	9000	750
Costo terminal (US$)	300	--	750	2500 - 3000	--	1000
Vida Satélite (años)	10	10	7.5	5	10	5
Llamadas US$/min.	0.65	1-2	0.35 - 0.55,	3	--	0.5

Tabla 2.8 Orbitas

	Odyssey	ICO	Globalstar	Iridium	Teledesic	Ellipso
Órbita	MEO	MEO	LEO	LEO	LEO	MEO
Altitud (km)	10354	10355	1400	780	1375	8040
Número de Satélites	12 + 3	10 + 2	48 + 8	66 +6	288	18+4
Número de planos	3	2	8	6	12	1
Inclinación (°)	55	45	52	86.4	98.16	116.5
Período (min.)	359.53	358.9	114	100.13	98.77	280
Tiempo visibilidad (min.)	47.27	57.80	8.21	5.54	1.74	41.77
Min. retardo de propagación (ms)	34.6	34.5	4.63	2.60	2.32	--
Máx. retardo de propagación (ms)	44.3	48.0	11.5	8.22	3.40	38.7; 38.7

Tabla 2.9 Características del haz

	Odyssey	ICO	Globalstar	Iridium	Teledesic	Ellipso
Método de acceso múltiple	CDMA	TDMA	CDMA	FDMA TDMA	TDMA FDMA	CDMA
Haces por satélite	61	163	16	48	64	61
Haces totales	732	1630	768	3168	18432	--
Diámetro haz (km)	--	--	2254	600 (min.)	25	--
Diámetro huella (km)	10540	--	5850	4700	1412	; 11960

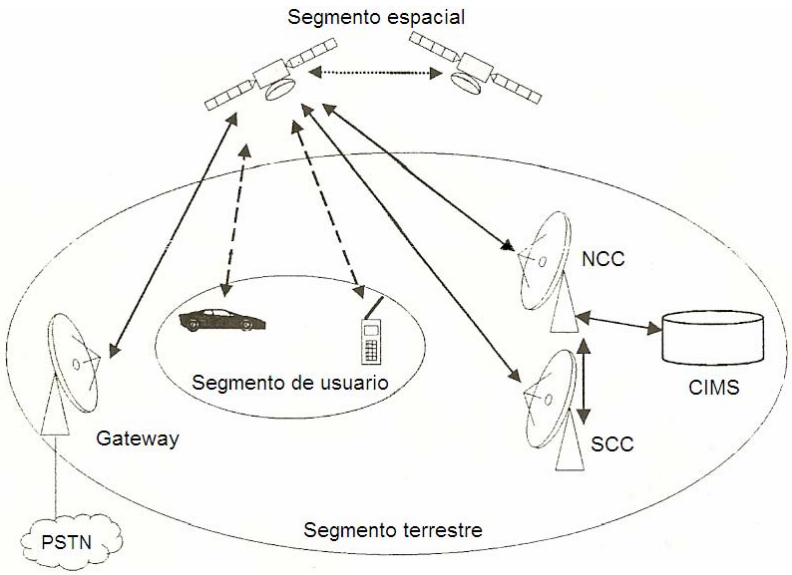
Antenas	Dirigible, celdas fijas	Fija	Fija, celdas móviles	Fija, celdas móviles	Dirigible, celdas fijas	Fija, celdas móviles

Tabla 2.10 Frecuencias

	Odyssey	**ICO**	**Globalstar**	**Iridium**	**Teledesic**	**Ellipso**
Enlace descendente (MHz)	2483.5 - 2500.0 (banda-S)	1980 - 2010	2483.5 - 2500.0 (banda-S)	1616.0 - 1626.5 (banda-S)	(banda-Ka)	2483.5 - 2500.0 (banda-S)
Enlace ascendente (MHz)	1610.0 - 1626.5 (banda-L)	2170 -2200	1610.0 - 1626.5 (banda-L)	1616.0 - 1626.5 (banda-L)	(banda-Ka)	1610.0 - 1626.5 (banda-L)
Procesamiento a bordo (OBP)	No	--	No	Sí	Sí	--
Enlace inter-satelital (ISL) GHz	N/A	N/A	N/A	23.180 - 23.380	40-50	--

CAPÍTULO III

ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN UNA RED SATELITAL



3.1 Segmento espacial

El segmento espacial es la conexión entre los usuarios de la red y las estaciones terrenas. Consiste en una o más constelaciones satelitales, cada una de las cuales con parámetros orbitales individuales muy específicos.

Dichas constelaciones están localizadas en órbitas específicas, sin embargo puede haber sistemas orbitales híbridos, como por ejemplo el sistema **ELLIPSO,** que utiliza dos tipos diferentes de órbitas, una es circular para tener cobertura por encima del ecuador y la otra es elíptica para tener cobertura en latitudes del norte del planeta.

La determinación de la órbita en la que va a estar situada la constelación depende de muchos factores y desde el diseño del satélite debe establecerse claramente la región de cobertura deseada, y la calidad de los servicios que serán brindados dentro de esas regiones y determinar de esa manera los parámetros orbitales específicos para esa constelación en particular.

De igual manera, para poder brindar cobertura global continua, el satélite debe ser diseñado de manera minuciosa, ya que debe cumplir con requerimientos técnicos y comerciales de la red. De una manera muy simple, podemos decir que un satélite de comunicaciones es repetidor y su función principal es recibir señales por medio de enlaces de subida (*uplink*), y transmitirlas de regreso a la Tierra por medio de enlaces de bajada (*downlink*).

Con el avance de la tecnología, los satélites cuentan con repetidores multi-canal y el camino de cada uno de estos canales recibe el nombre de transpondedor, en donde se lleva a cabo la amplificación de la señal, supresión de interferencia y traslación de frecuencia. Podemos decir que existen tres principales tipos de arquitecturas de satélites:

- Carga útil transparente
- Capacidad para realizar procesamiento de señales abordo (***on-board processing, OBP***)

- Capacidad de realizar enlaces inter-satelitales dentro de la misma constelación (***Inter-satellite links, ISL***), o poder realizar enlaces con satélites de otras constelaciones (***Inter-constellation links***)

El segmento espacial puede ser compartido entre diferentes redes. Para satélites que no son geoestacionarios, puede compartirse en tiempo y espacio. Al hablar de compartir el segmento espacial en tiempo se refiere a compartir los recursos del satélite entre diferentes redes, localizadas dentro de una región en común en diferentes tiempos. Ahora, compartir en espacio se refiere a compartir los recursos del satélite entre diferentes redes satelitales localizados en diferentes regiones.

Un sistema no geoestacionario, que no tiene cobertura continua, comparte espacio entre diferentes redes en diferentes áreas y comparte el segmento espacial en tiempo para redes dentro de la misma área. El compartir en tiempo requiere un proceso de coordinación más eficiente que para compartir en espacio.

El segmento espacial es diseñado en base a la órbita en la cual será puesto y dependiendo de la tecnología de la carga útil que el satélite lleve abordo. Es factible pensar en el uso de diferentes órbitas satelitales para proveer servicios complementarios, ya que los satélites pueden comunicarse entre sí por medio de enlaces inter-satelitales (***ISL***) o enlaces inter-orbitales (***IOL***).

Este tipo de enlaces, cuando se usan de manera combinada, forman una red que utiliza equipo de "ruteo", que puede tener abordo el satélite. Esto es una gran ventaja, ya que mientras más sofisticado es el segmento espacial menos dependiente será de la red terrestre y, por lo tanto, se reduce el número de estaciones terrenas o ***gateways***.

A continuación, en la figura 3.1, se presentan cuatro diferentes arquitecturas de comunicación personal utilizando satélites no geoestacionarios, que en algunos casos interactúan con satélites geoestacionarios y de esta manera puede reducirse la necesidad de utilizar el segmento terrestre, considerando cobertura global.

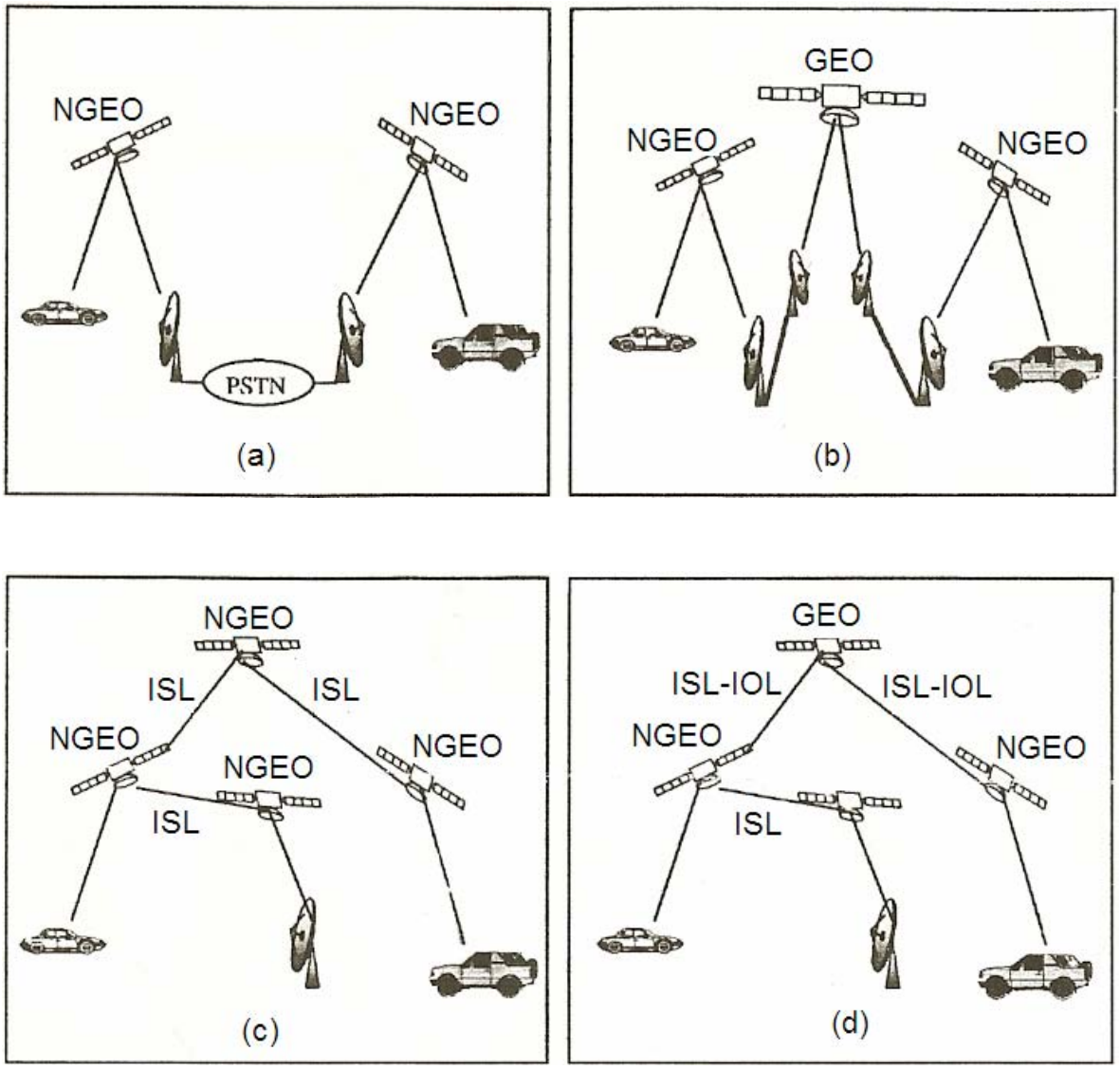


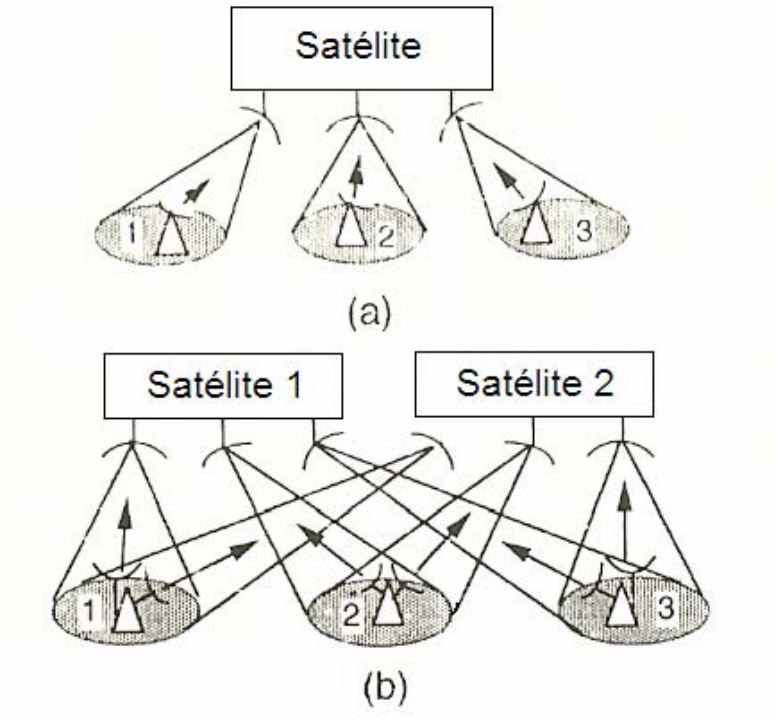
Figura 3.1 Arquitecturas de comunicación satelital personal

En el primer escenario (a), los satélites se comunican directamente con las estaciones terrenas utilizando sus transpondedores y la red depende completamente del segmento terrestre para realizar la conexión entre los *gateways* con ayuda de la ***PSTN (Public Switched Telephone Network)***. En el escenario (b), se utiliza un satélite geoestacionario para la conexión entre estaciones terrenas, y de esa manera se reduce la dependencia en el segmento terrestre.

En la opción (c), se utilizan enlaces inter-satelitales (***ISL***) para establecer comunicación entre satélites que tengan la misma configuración orbital (satélites no geoestacionarios). Los haces que son emitidos en este tipo de enlaces no van dirigidos hacia la Tierra sino hacia otros satélites. Para comunicación bidireccional entre los satélites se necesitan dos diferentes haces, uno para la transmisión y otro para la recepción. Aquí también se reduce la necesidad de utilizar un *gateway*, aunque este puede realizar ciertas funciones que la red requiera.

En el escenario (d), se utiliza una constelación híbrida, es decir, se utilizan enlaces inter-satelitales (***ISL***) entre satélites no geoestacionarios y enlaces inter-satelitales (***ISL***) inter-orbitales (***IOL***) (***ISL-IOL***) con un satélite geoestacionario, el cual es accesado directamente por el satélite no geoestacionario, y si se quisiera tener inter-conexión global, serán requeridos tres satélites geoestacionarios.

En la figura 3.2 pueden apreciarse distintas situaciones que pueden presentarse en una red satelital, y en algunas de ellas se utilizan enlaces inter-satelitales, con el fin de incrementar la capacidad del sistema.



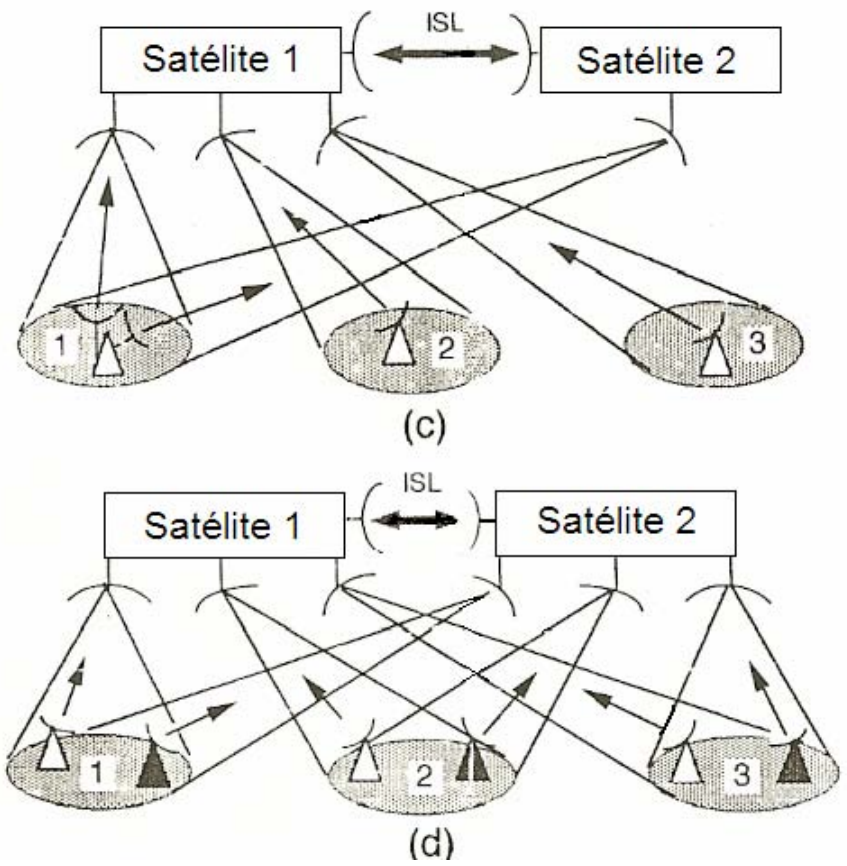


Figura 3.2 (a) Red con un solo satélite. (b) Un segundo satélite es lanzado para incrementar la capacidad del segmento espacial; las estaciones terrenas deben ser equipadas con dos antenas. (c) Con la implementación de un enlace inter-satelital, solamente las estaciones que están localizadas dentro de la región con mayor recepción de información son equipadas con dos antenas. (d) Las estaciones están distribuidas entre los dos satélites. Los enlaces inter-satelitales llevan el tráfico entre las estaciones terrenas.

3.2 Segmento terrestre

Otro elemento importante dentro de la red es el segmento terrestre, el cual consiste en tres componentes principales: ***gateways,*** comúnmente llamadas estaciones terrenas fijas (***FES, Fixed Earth Station***), el centro de control de la red (***NCC, Network Control Center***) y el centro de control del satélite (***SCC, Satellite Control Center***), como se muestra en la figura 3.3

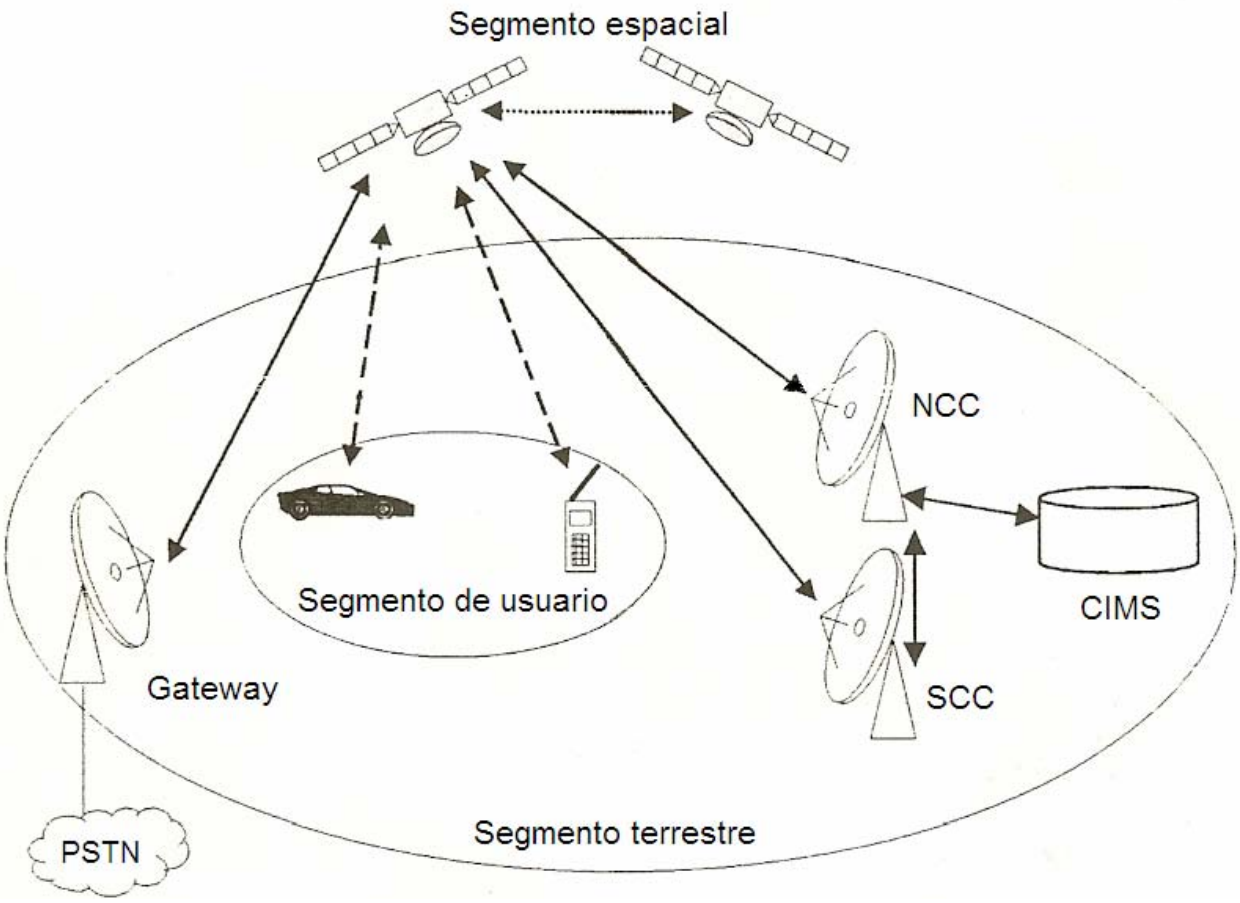


Figura 3.3 Componentes principales de una red satelital

Los *gateways* proveen puntos de entrada fijos a la red de acceso satelital implementando conexiones a las ya existentes en la red, por ejemplo, a la ***PSTN*** (***Public Switched Telephone Network***) o a la ***PLMN*** (***Public Land Mobile Network***) a través de

intercambios locales. Un sólo *gateway* puede estar asociado con un sólo haz, o varios *gateways* pueden estar localizados en diferentes puntos dentro del mismo haz, esto cuando la cobertura es internacional.

De igual manera, un *gateway* puede proporcionar acceso a más de un haz, esto en los casos en los que la cobertura de los mismos se traslape. Por lo tanto, los *gateways* permiten a las terminales de usuario tener acceso a la red que se encuentra dentro de su propia región de cobertura.

El centro de control de la red (***NCC***) está conectado directamente con el Sistema de Manejo de Información de los Clientes (***CIMS, Customer Information Management System***) con el objeto de coordinar el acceso a los recursos del satélite y realiza las funciones lógicas que están relacionadas con el manejo y control de la red, tales como:

- **Funciones de manejo de la red**
    - Desarrollo del perfil del tráfico de llamadas
    - Manejo de los recursos del sistema y sincronización de la red
    - Funciones de operación y mantenimiento
    - Manejo de los enlaces de señalización entre estaciones
    - Control de congestión
    - Proveer soporte para terminales de usuario
- **Funciones de control de llamadas**
    - Funciones de señalización en el canal común
    - Selección del *gateway* correspondiente para un enlace móvil
    - Definición de las configuraciones del *gateway*

El centro de control del satélite (***SCC***) monitorea el desempeño de la constelación satelital y controla la posición de los satélites en el espacio. También, lleva acabo funciones de control de llamadas que están directamente desarrolladas con la carga útil del satélite.

Las funciones principales del centro de control del satélite, en resumen, son las siguientes:

- **Funciones de control del satélite**
  - Generación y transmisión de órdenes para el *bus* y la carga útil del satélite
  - Recepción y procesamiento de telemetría
  - Transmisión de órdenes para mantener la dirección correcta del haz
  - Ejecución de calibración del alcance del satélite

Las funciones del control de llamadas incluyen *"switcheo"* en tiempo real para llamadas de un dispositivo móvil a otro dispositivo móvil. El **CIMS** es responsable de mantener la configuración de la información del *gateway*; ejecutar el "*billing*" del sistema y llevar registros detallados de las llamadas. El ***NCC***, ***SCC*** y ***CIMS*** pueden agruparse para dar lugar a lo que se conoce como el **segmento de control**.

3.2.1 Estaciones terrenas

Puede definirse una estación terrena como el conjunto de varios dispositivos interconectados para mantener comunicación continua con el satélite. Pueden existir estaciones terrenas muy grandes y complejas en su diseño, por ejemplo las que brindan comunicación internacional, y estaciones muy pequeñas que utilizan sólo una antena y dispositivos de recepción, como en el caso de los sistemas de televisión caseros. De manera muy general, en la figura 3.4 se muestra un diagrama a bloques de cómo esta constituida una estación terrena, incluyendo el segmento espacial.

Debido a las características de comunicación de algunas estaciones terrenas no es aceptable que los enlaces se pierdan, es por eso que deben contar con una planta de energía propia de respaldo en el caso de alguna falla eléctrica.

Estas características pueden ser, por ejemplo, cuando el tráfico que se maneja es de tipo internacional o cuando los enlaces se clasifican como prioritarios. En la figura 3.5 se

muestra un diagrama a bloques de los diferentes elementos que conforman una estación terrena.

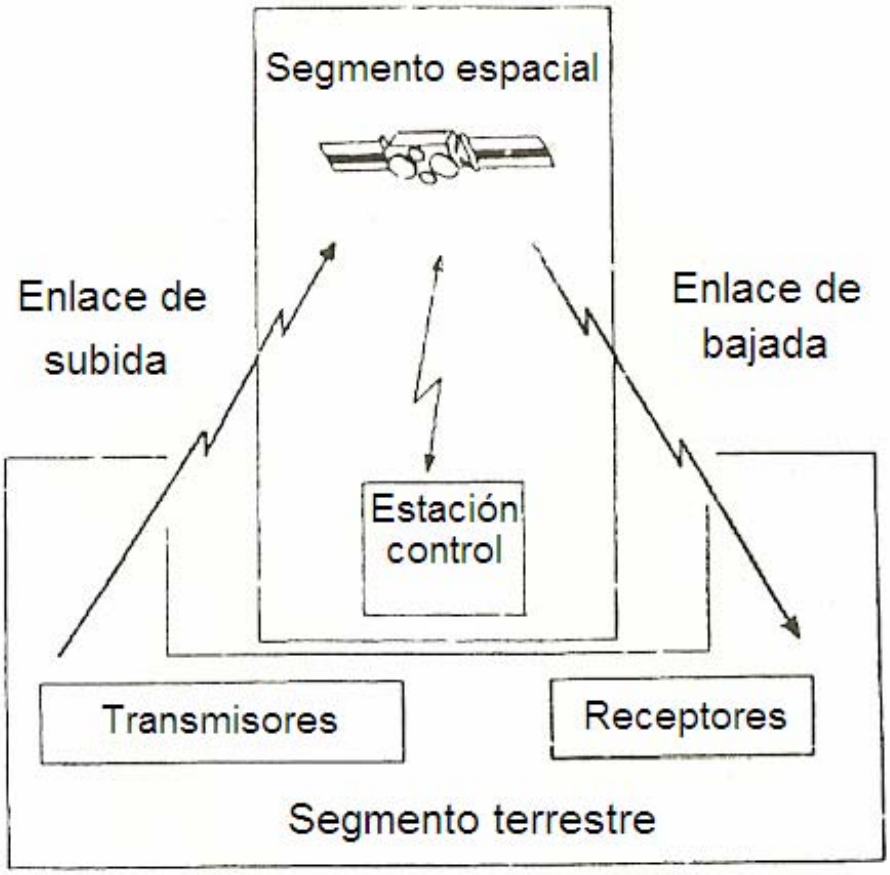


Figura 3.4 Elementos de una estación terrena

Tal vez el elemento más característico de una estación terrena son sus antenas que, dependiendo de sus aplicaciones, pueden ser de diferentes tamaños y diseños. Definitivamente, las características más importantes de una antena son su ganancia y su patrón de radiación.

Es por esta razón que se busca tener la ganancia máxima en la dirección que se transmiten y reciben las señales, es decir, en el lóbulo principal, y la ganancia mínima en direcciones diferentes, por lo que siempre se busca que los lóbulos laterales sean pequeños. Otras razones por las cuales se requiere que los lóbulos laterales sean minimizados al

máximo son: para que no transmitan en direcciones no permitidas, para que no capten señales de otros sistemas de comunicaciones y señales provenientes de otros satélites.

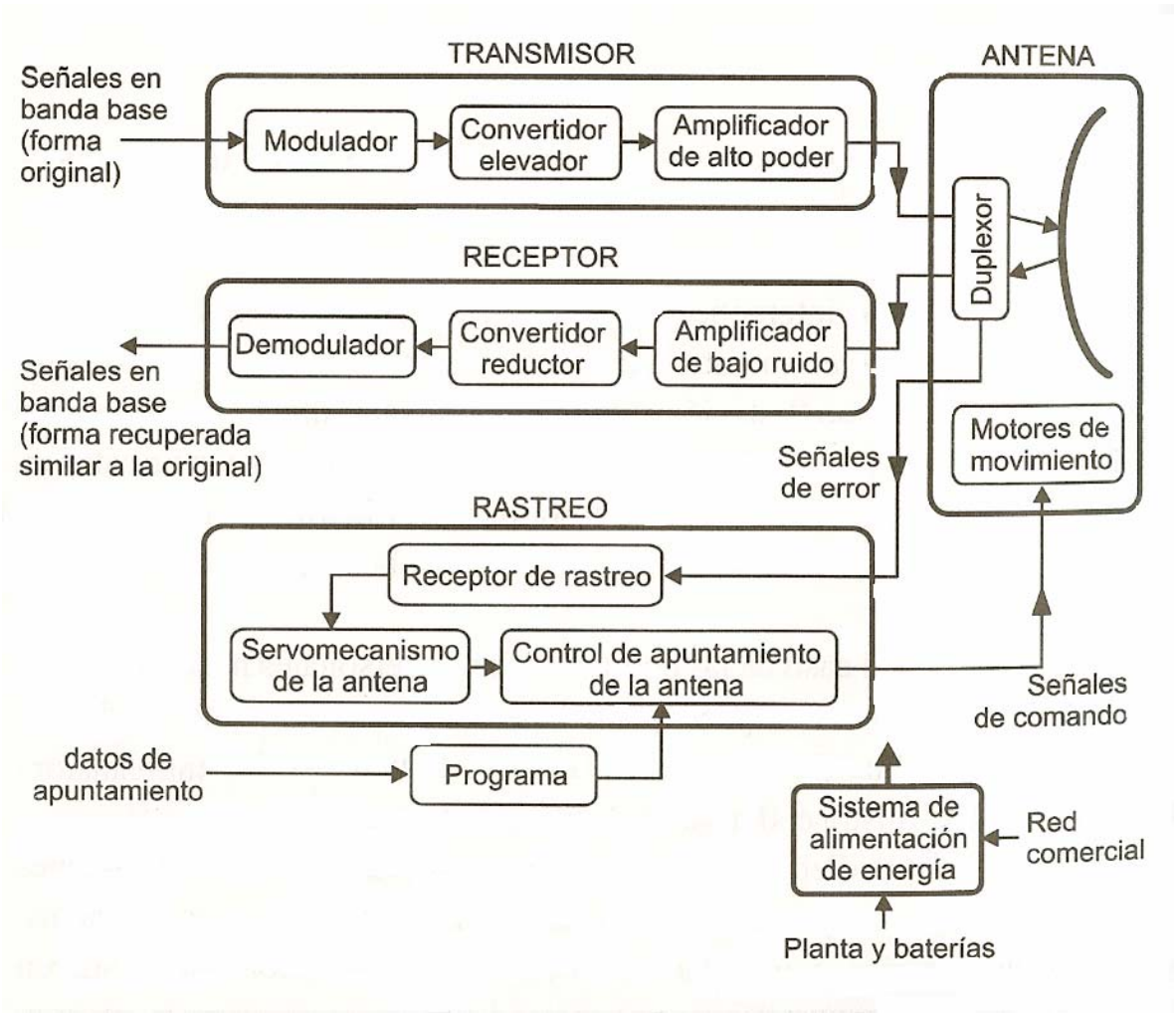


Figura 3.5 Diagrama a bloques de una estación terrena

La ganancia de una antena está relacionada con la dirección de máxima radiación, es decir, el eje del lóbulo principal en el patrón de radiación. El valor de la ganancia depende de diferentes elementos, como: la concavidad de la antena, su diámetro, la rugosidad de la superficie, los alimentadores utilizados y la posición de los mismos.

Si las dimensiones de la antena son grandes, por consecuencia, la ganancia será mayor, puesto que el lóbulo principal del patrón de radiación es más angosto y los lóbulos laterales se reducen de tamaño, como se puede observar en la figura 3.6. Ahora, si el

diámetro se conserva constante, puede obtenerse el mismo resultado aumentando la frecuencia de operación, ya que, hablando en términos de longitudes de onda, la antena es más grande.

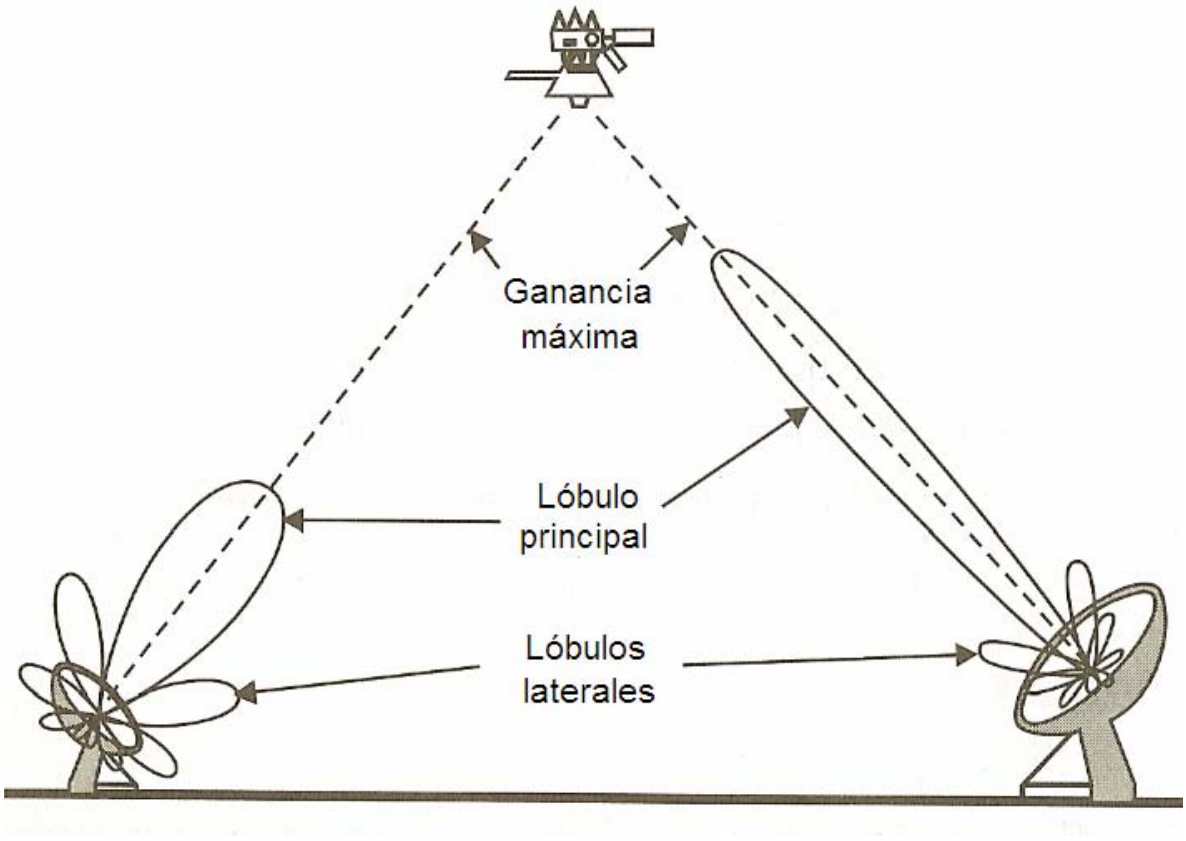


Figura 3.6 Patrón de radiación de dos antenas de dimensiones diferentes

En el modo de recepción, la antena concentra las señales que llegan a ella en un sólo punto llamado foco; y en el modo de transmisión, las señales provenientes del foco las refleja y las concentra en un haz o lóbulo muy angosto.

El foco coincide con el foco geométrico de la antena y es ahí en donde se coloca el alimentador, que por lo regular es una antena tipo corneta, la cual define la ganancia final de la antena, y por consecuencia definirá también las características del patrón de radiación, es decir, las características de los lóbulos.

El tipo de alimentación puede ser frontal, descentrada (***off-set***) y Cassegrain. En la figura 3.7 se muestra una antena parabólica con alimentación frontal y se observa que el eje del alimentador coincide con el eje de la antena.

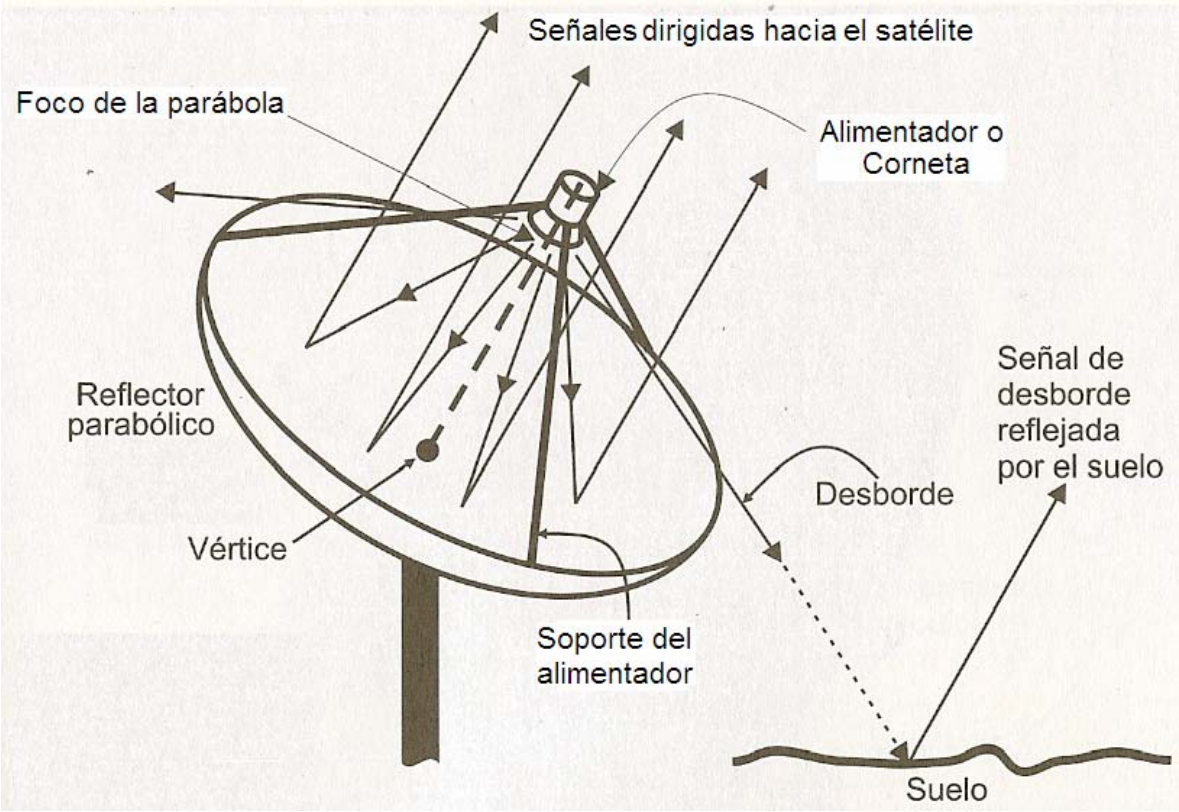


Figura 3.7 Antena parabólica con alimentación frontal

También puede apreciarse que la apertura del alimentador está orientada hacia el piso, lo que trae como consecuencia desborde de la energía radiada, es decir, no toda la energía se concentra en el plato parabólico, parte de ella se desperdicia y al tocar el suelo ésta energía es reflejada y puede afectar la señal que esta siendo transmitida.

De igual manera, en el modo de recepción, las ondas recibidas de satélite y que incidan en el suelo, pueden ser reflejadas por la superficie cercana a la antena hacia la apertura del alimentador y provocar que la calidad de la señal se degrade.

Otro inconveniente que puede presentarse con este tipo de alimentación es el bloqueo de la señal, provocado por la ubicación del alimentador, el equipo electrónico que se coloca detrás del alimentador y el soporte utilizado para los mismos. Pero a pesar de esto, para ciertos fines de operación (principalmente dentro de la banda C) este tipo de antena resulta satisfactoria, además de ser económica y relativamente fácil de construir.

Si por el tipo de aplicación se requiere eliminar este bloqueo, la opción sería utilizar una antena de alimentación descentrada (***off-set***), la cual se aprecia en la figura 3.8, que consiste en utilizar sólo una parte del plato parabólico, donde la apertura del alimentador está orientada hacia la parte restante del reflector y ya no hacia su vértice, por lo que el eje del alimentador y del paraboloide ya no coinciden, de ahí el nombre de alimentación descentrada u ***off-set***.

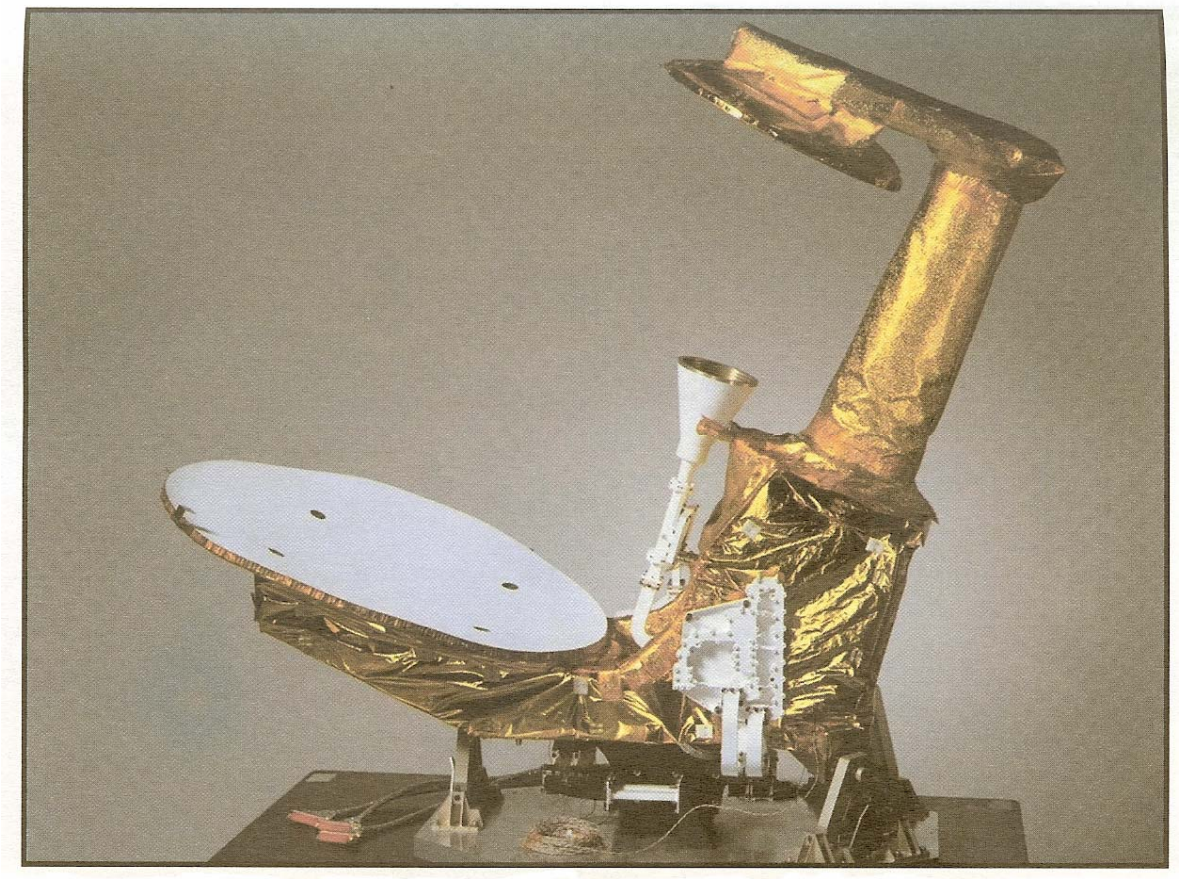


Figura 3.8 Antena parabólica con alimentación descentrada

Las principales aplicaciones de este tipo de antenas son en las redes VSAT para telefonía y datos, en las bandas Ku y Ka y en los equipos de recepción de TV digital directa en el mercado residencial. Las antenas tipo Cassegrain son muy utilizadas debido a que, en comparación con los otros dos tipos de antenas, se obtiene mayor ganancia y es más eficiente, sin embargo, el precio también es mayor. Las antenas de este tipo se utilizan en estaciones terrenas transmisoras y receptoras de señales de televisión, en estaciones que transmiten y reciben telefonía y datos en grandes cantidades, en los telepuertos y centros de control de satélites.

En la configuración de esta antena se cuenta con un segundo reflector de superficie hiperbólica al cual se le denomina "subreflector", donde ahora el alimentador se encuentra localizado en el vértice de la parábola, por lo que la apertura de este ya no se orienta hacia el piso sino hacia arriba, esto puede observarse en la figura 3.9.

Figura 3.9 Antena parabólica tipo Cassegrain

Teniendo como base esta configuración, los ejes del alimentador, del subreflector hiperbólico y de la parábola coinciden, y como resultado de esto, la energía que radia el alimentador se captura mejor (figura 3.10), disminuyendo de manera importante el desborde de energía.

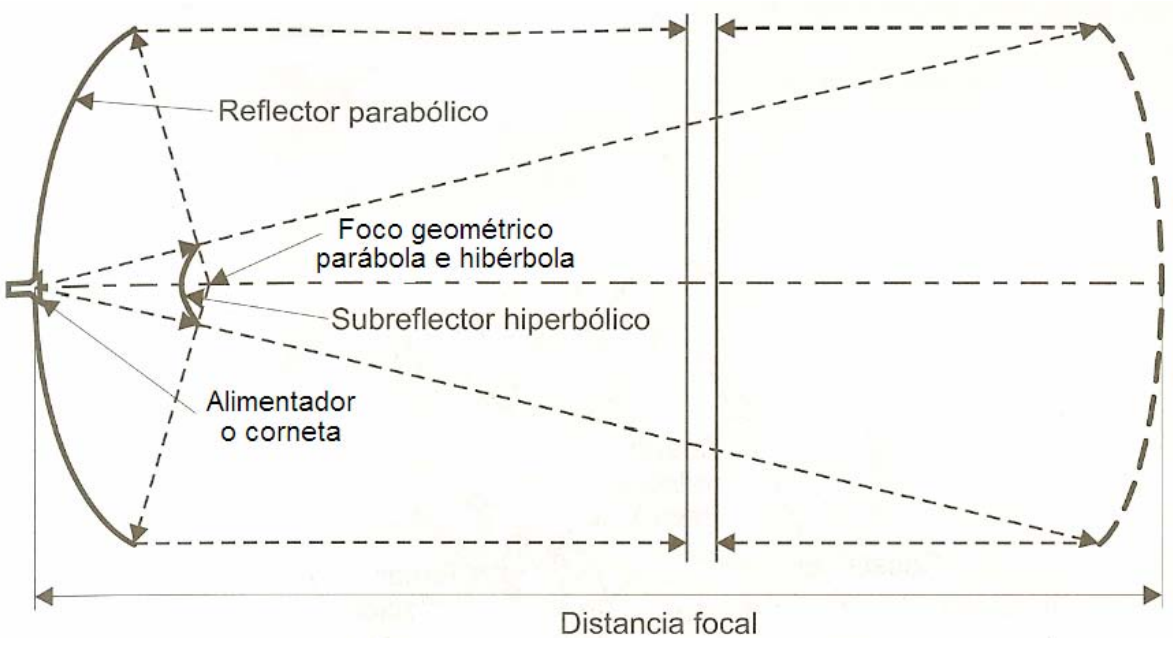


Figura 3.10 Diagrama de la antena Cassegrain

Otra ventaja que ofrece esta antena es que inmediatamente detrás del alimentador puede colocarse el equipo electrónico dentro de una pequeña cabina diseñada especialmente para ese fin, reduciendo así las pérdidas presentadas por tendidos de cable o guías de ondas muy largos, y como resultado de esto también facilita el mantenimiento del equipo.

Hablando de la antena Gregoriana (figura 3.11), la cual es muy parecida a la antena Cassegrain, sólo que en lugar de utilizar un subreflector hiperbólico utiliza un subreflector elíptico y puede utilizar alimentación descentrada (***off-set***).

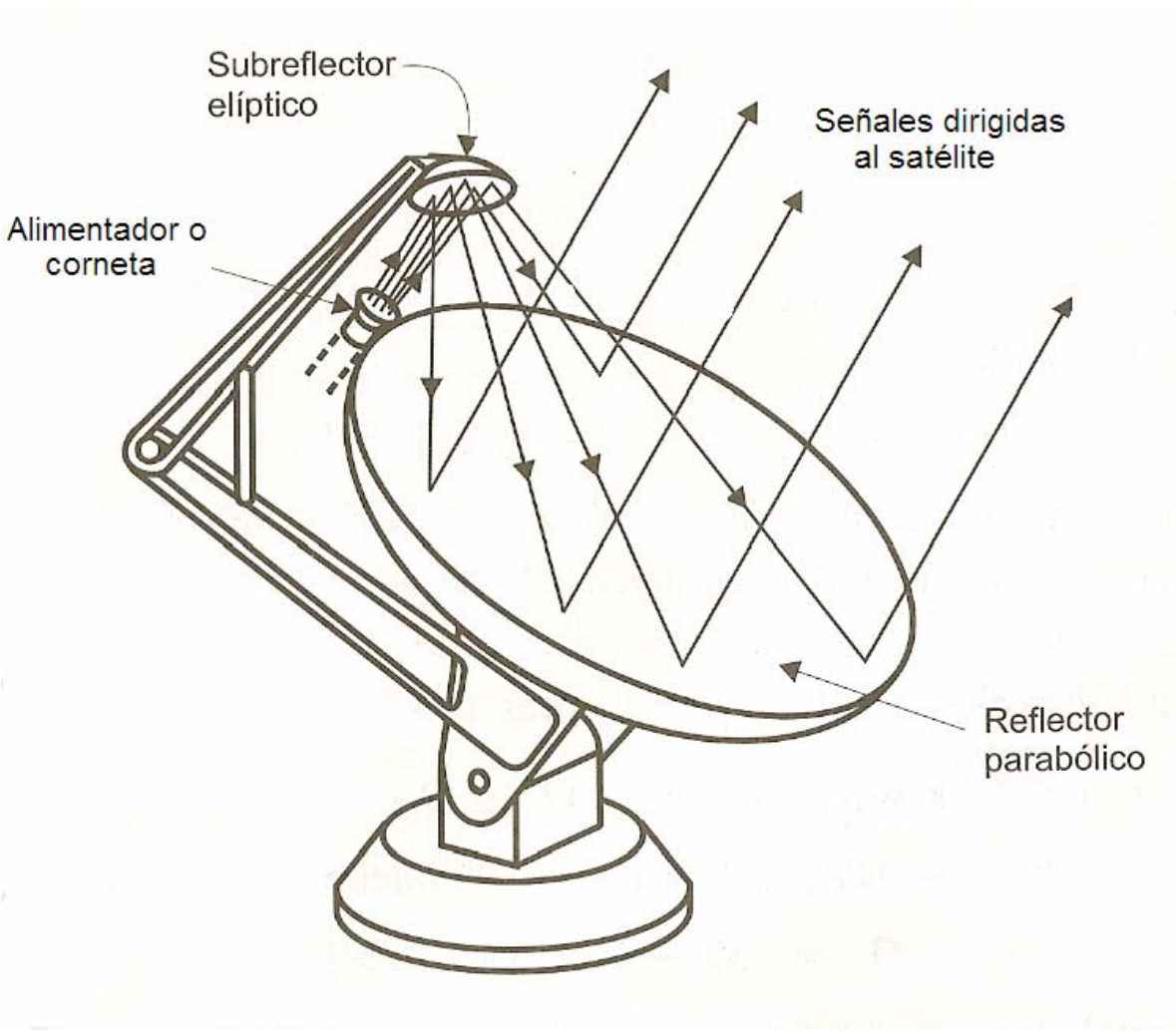


Figura 3.11 Antena Gregoriana con alimentación descentrada

3.3 Segmento de Usuario

El segmento de usuario está compuesto por las terminales que posee el usuario. En la figura 3.12 se muestran algunos servicios que ofrecen los sistemas satelitales, como Internet, telefonía móvil, etc. Las características de las terminales dependen de su aplicación y del ambiente operacional.

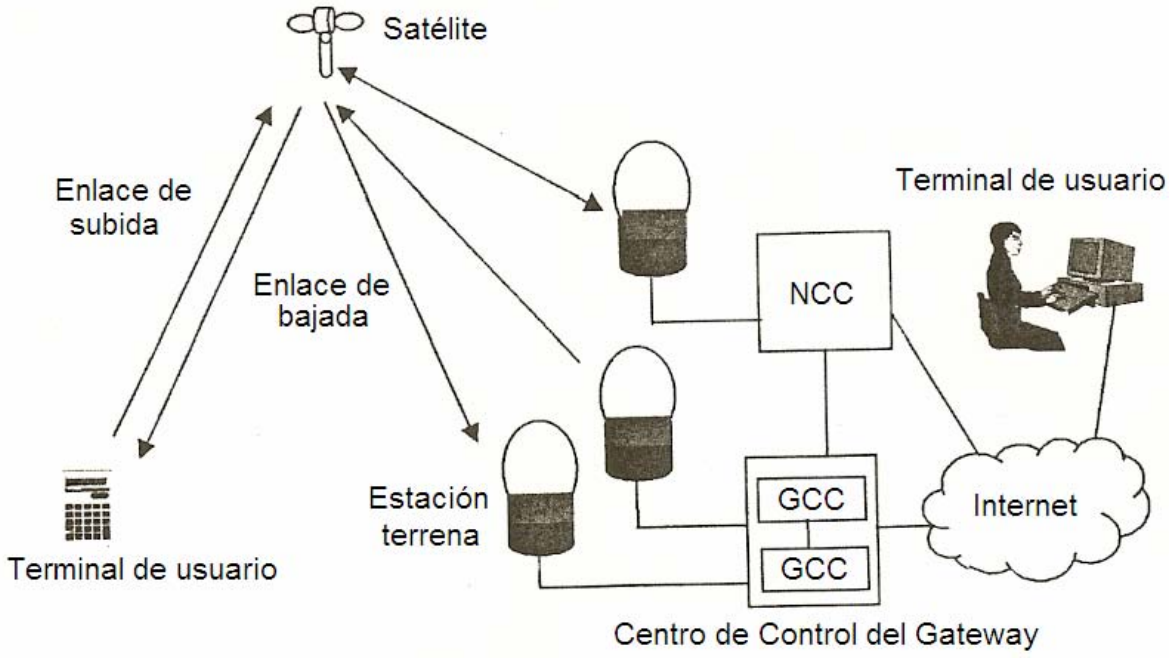


Figura 3.12 Terminales de usuario

En general, las terminales de usuario pueden dividirse en dos categorías principalmente:

- **Terminales móviles:** son unidades que soportan movilidad total cuando se encuentran operando, y a su vez, éstas pueden dividirse en terminales móviles personales y terminales móviles de grupo.

- **Terminales móviles personales:** regularmente son terminales tipo *palm* o terminales similares a un teléfono celular (figura 3.13). Dentro de esta categoría también se tienen las terminales que se encuentran en plataformas móviles, como por ejemplo un coche.

- **Terminales móviles de grupo:** este tipo de terminales están especialmente diseñadas para ser colocadas a bordo de transporte colectivo, como puede ser un tren, un autobús, aviones, barcos, etc.

- **Terminales portátiles:** son unidades que son similares al tamaño de un portafolios o una computadora tipo *lap-top*. Este tipo de terminales pueden ser transportadas de un lugar a otro pero, a diferencia de las terminales móviles, éstas no soportan operar cuando se encuentran en movimiento.

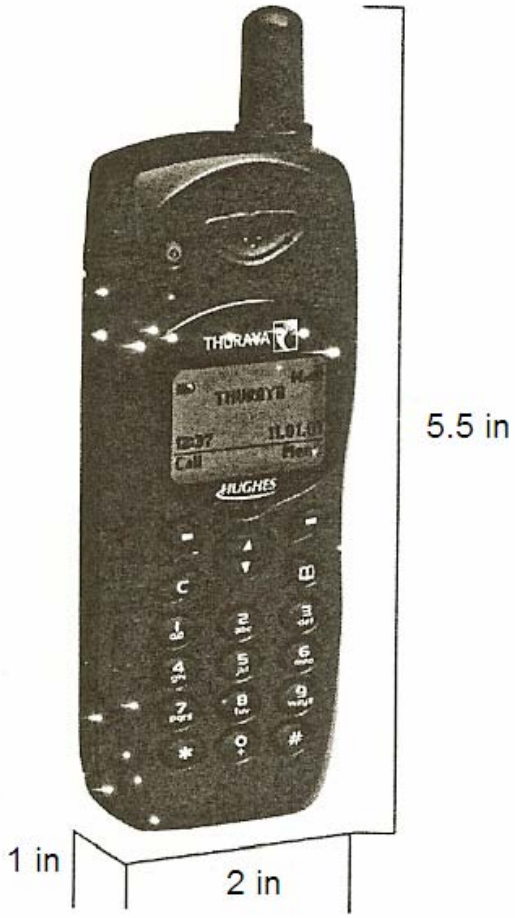


Figura 3.13 Terminal móvil de usuario

3.4 Reutilización de frecuencias

El espectro radioeléctrico disponible para los satélites de comunicaciones está bien definido y, por lo tanto, los anchos de banda en las frecuencias asignadas están limitados, por ejemplo, el ancho de banda para las bandas C y Ku es de 500 MHz tanto en la transmisión (5.925 GHz - 6.425 GHz) y (14.0 GHz – 14.5 GHz) como en la recepción (3.700 GHz – 4.200 GHz) y (11.7 GHz – 12.2 GHz), respectivamente.

Sin embargo, la capacidad de los satélites puede aumentarse y duplicar las frecuencias asignadas sin producir interferencias significativas. Esto puede realizarse por medio de la reutilización de frecuencias, que puede ser:

- Con aislamiento espacial o
- Con discriminación de polarización.
-

En el primer caso, se utiliza una antena que emita haces que estén dirigidos hacia zonas geográficas alejadas entre sí, de manera que las huellas del satélite están tan separadas que pueden emplearse las mismas frecuencias, es decir, que el satélite transmite con el mismo rango de frecuencias en dos distintas regiones, como se muestra en la figura 3.14

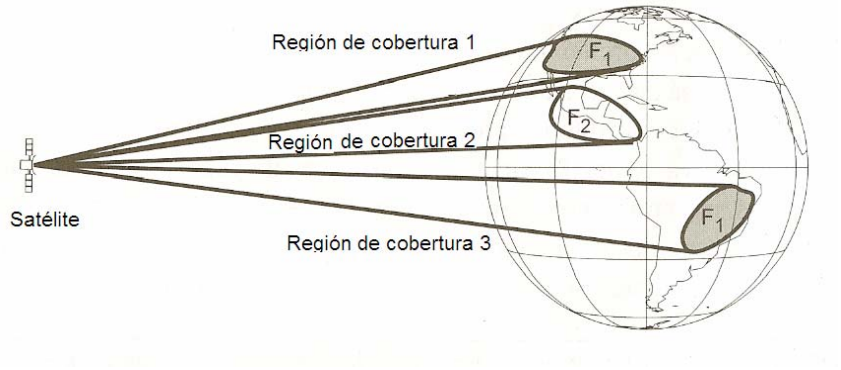


Figura 3.14 Reutilización de frecuencias con aislamiento espacial

La reutilización de frecuencias con discriminación de polarización se lleva acabo mediante la transmisión simultánea de un haz a la misma frecuencia con polarización ortogonal, es decir, dos señales diferentes son emitidas con polarizaciones ortogonales, es decir, la direcciones de su campo eléctrico mantienen un ángulo de 90° entre ellas siempre. En la figura 3.15 se ejemplifica la reutilización de frecuencias utilizando polarización vertical y horizontal.

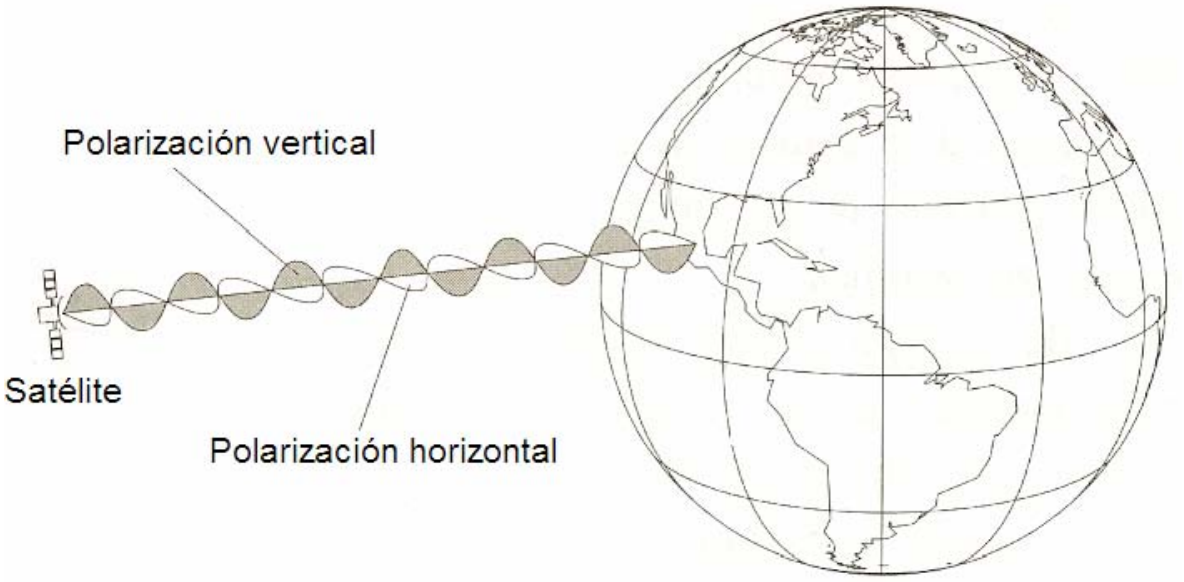
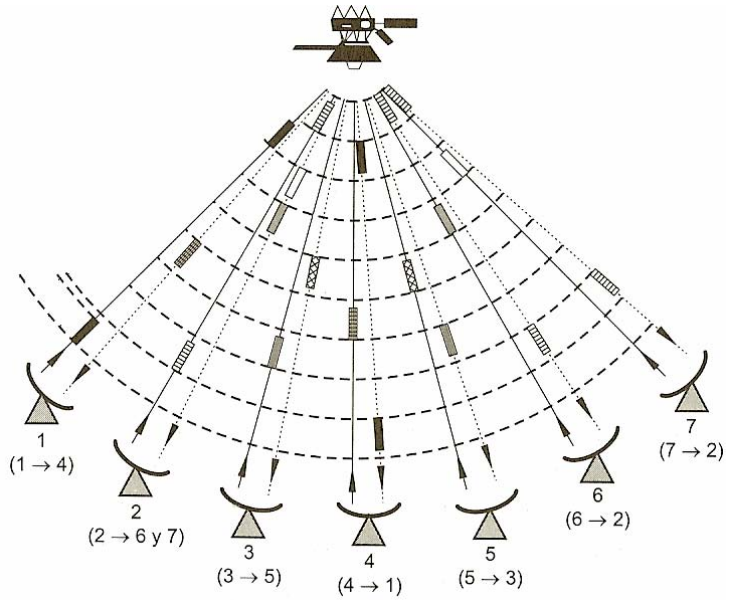


Figura 3.15 Reutilización de frecuencias con discriminación de polarización

En teoría, el ancho de banda utilizado es duplicado, pero en la práctica no es así, ya que muchos factores intervienen, y algo que es necesario mencionar es la importancia de la asignación de la frecuencia central en los transpondedores que utilizan polarización ortogonal, ya que de esta manera se reduce la interferencia por reutilización de frecuencias.

CAPÍTULO IV

MULTIPLEXAJE Y MODULACION UTILIZADAS EN LOS SATELITES DE ORBITA BAJA



Las técnicas de multiplexaje permiten la transmisión de múltiples señales en una sola señal más compleja, con el propósito de modular a una portadora única para ser transmitida y que conserve las señales individuales originales. A esto se le llama múltiples canales por portadora (***MCPC, Multiple Channel Per Carrier***).
Existen tres diferentes técnicas de multiplexaje:

- Por división de frecuencia (***FDM, Frequency-Division Multiplexing***)
- Por división de tiempo (***TDM, Time -Division Multilexing***)
- Por división de código (***CDM, Code-Division Multiplexing***)

4.1 Multiplexaje por División de Frecuencia

En esta técnica, el ancho de banda disponible se divide en distintos canales de frecuencia que no se traslapan unos con otros. En el caso de un sólo transmisor, este utiliza cierto número de canales de frecuencia para transmitir la señal multiplexada. En el caso de diferentes transmisores, estos transmiten de manera simultánea a frecuencias diferentes y los receptores seleccionan las señales con los filtros apropiados. Este método de acceso recibe el nombre de Acceso Múltiple por División de Frecuencia (***FDMA, Frequency Division Multiple Access***). En redes satelitales, el receptor **FDMA** puede encontrarse a bordo del satélite o en la estación terrena.

4.2 Multiplexaje por División de Tiempo

El tiempo es dividido en intervalos (***slots***) que no se traslapan. Un slot de tiempo es asignado periódicamente a cada una de las señales que serán multiplexadas. Un período de slots constituye una trama de **TDM**. Las señales multiplexadas son divididas en bloques de información, y cada uno de estos cabe en un slot de tiempo. En el caso de un sólo transmisor, los bloques de información forman una señal continua, ya que los tiempos de guarda no son necesarios. La señal es transmitida en una sola portadora y los usuarios seleccionan los bloques de información por medio de filtros de tiempo.

4.3 Multiplexaje por División de Código

Las señales multiplexadas son transmitidas a la misma frecuencia al mismo tiempo, pero son separan modulándolas con señales codificadas ortogonales. En el acceso por división de código (***CDMA***) los usuarios modulan las señales con códigos diferentes. El acceso múltiple es la manera en la que las estaciones terrenas pueden interconectar sus respectivos enlaces de voz, datos, facsímile y televisión a través de un satélite, y explotar la capacidad de cobertura y transmisión de un canal satelital. Es decir, muchas fuentes intentan transferir información a través del transpondedor de un satélite, por lo que la capacidad de comunicación del mismo es compartida entre diferentes estaciones terrenas.

Cada canal o transpondedor tiene la tarea de amplificar cada portadora, cuyo espectro este dentro de la pasabanda del mismo. El recurso que ofrecen cada uno de estos canales puede ser representado en un plano de frecuencia y tiempo, el cual representa el ancho de banda del canal y la duración de operación. Si no se tienen las precauciones necesarias, dichas portadoras ocupan el mismo plano de manera simultánea y puede producirse interferencia, por lo que las estaciones receptoras deben contar con el equipo necesario para “discriminar” las portadoras que son recibidas.

El principal problema que se enfrenta es cómo permitir que ese grupo de estaciones terrenas compartan un satélite de manera que optimice la capacidad del mismo, el uso del espectro electromagnético, la potencia, interconectividad y capacidad de adaptación a distintos tipos de tráfico. En la práctica, no todos los elementos mencionados pueden ser optimizados. La modulación es una técnica de procesamiento de señal que cambia la amplitud, frecuencia o fase de una portadora de acuerdo con la información binaria.

4.4 Técnicas de modulación

La técnica de modulación más utilizada en enlaces satelitales analógicos es **FM**, que significa frecuencia modulada, por sus siglas en inglés (***Frequency Modulation***). En esta técnica, la frecuencia de la portadora varía con respecto a la amplitud de la señal de entrada,

y de esta manera, se mantiene constante la amplitud de la portadora que esta siendo modulada. La modulación por frecuencia es utilizada porque es menos susceptible al ruido e interferencias del medio, a diferencia de la modulación por amplitud (**AM**). Básicamente, la modulación por frecuencia es utilizada por estaciones de radio y en transmisión de televisión.

Entre las técnicas digitales de modulación utilizadas, podemos mencionar la modulación por desplazamiento de amplitud (***ASK, Amplitude-Shift Keying***), la modulación por desplazamiento de frecuencia (***FSK, Frequency-Shift Keying***) y la modulación por desplazamiento de fase (***PSK, Phase- Shift Keying***).

La técnica más comúnmente utilizada en los enlaces satelitales es la modulación por desplazamiento de fase (**PSK**). Recordemos que los niveles de voltaje de los bits son discretos, es decir, unos y ceros. La fase de la señal portadora cambia de acuerdo con los bits de la señal moduladora, por lo tanto, la fase de la portadora modulada va a cambiar de manera discreta también (unos y ceros). Los estados o fases que la portadora puede tomar se definen como ***M*** y estos dependen del número de bits ***m*** consecutivos de información original que son utilizados para formar cada símbolo, lo que se pude expresar por la siguiente relación[1]:

$$\mathbf{M = 2^m} \qquad (4\text{-}1)$$

Lo que significa que si m = 1, la portadora va a tomar 2 estados diferentes, lo cual es conocido como **BPSK**, o sea, modulación PSK binaria. Si m = 2, entonces M sería igual a 4, por lo que se tendrían 4 estados diferentes y la modulación es llamada **QPSK**. La manera más simple de expresar una señal BPSK es: $A\cos(\omega t + \phi)$, en donde,

A = amplitud — t = tiempo

ω = frecuencia angular — ϕ = fase

[1] *Maral, G., Bousquet M.,* ***Satellite Communication Systems****, 3ª edición, 1998, pág 117*

En este caso particular, $\phi = 0°$ cuando la señal de la banda base sea igual a "0" y $\phi = 180°$ cuando la señal de banda base sea igual a "1". En el caso de modulación QPSK cuando $\phi = 45°$ corresponde a "00", cuando $\phi = 135$ corresponde a "01", cuando $\phi = 225$ corresponde a "11" y cuando $\phi = 315°$ corresponde a "10".

Ahora, es necesario agregar un concepto conocido como tasa R_s de símbolos de la portadora modulada (el número de cambios de estado por segundo), la cual se cuantifica en símbolos por segundo [símbolos/s] o en baudios, y se calcula por medio de la siguiente ecuación[2]:

$$R_s = R_c / m = R_c / \log_2 M \text{ [baudios]} \qquad (4\text{-}2)$$

En donde, R_c esta dado en [bits/s]. En la figura 4.1 se muestra un ejemplo gráfico de la modulación BPSK y QPSK respectivamente en el plano conocido como **I-Q**, en donde **I** representa la componente en fase y **Q** representa la componente en cuadratura, y como puede observarse, la amplitud de la señal permanece constante y la fase cambia de acuerdo al número de estados correspondientes.

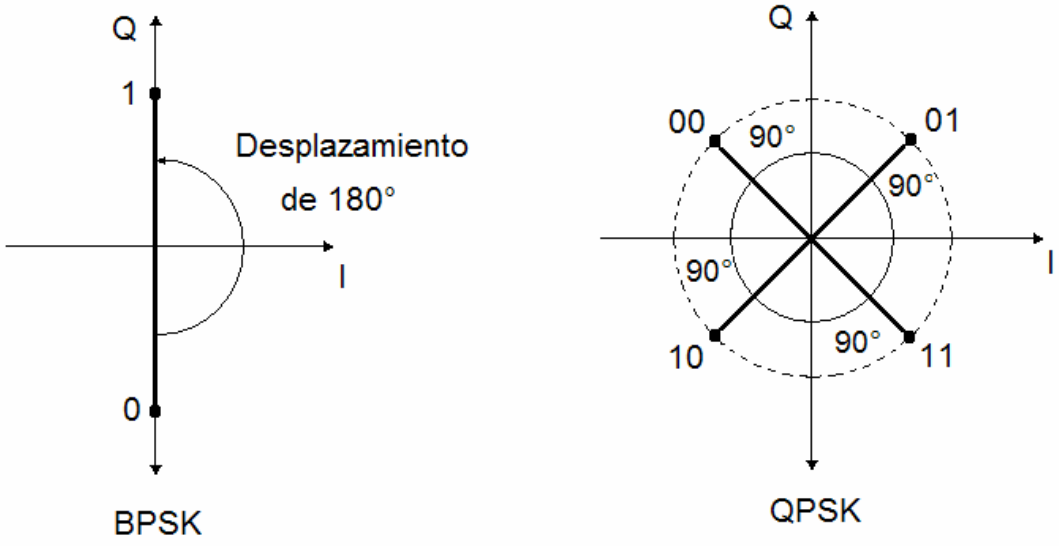


Figura 4.1 Representación de señales BPSK y QPSK

[2] *Maral, G., Bousquet M.,* ***Satellite Communication Systems****, 3ªedición, 1998, pág 117*

4.5 Acceso múltiple

Básicamente existen tres técnicas de acceso múltiple que son ejemplificadas en la figura 4.2, acceso múltiple por división de frecuencia (**FDMA**), en la que todos los usuarios comparten el satélite al mismo tiempo, pero cada uno transmite en su propia banda de frecuencia. Es comúnmente utilizado en modulación analógica, en donde las señales están presentes todo el tiempo.

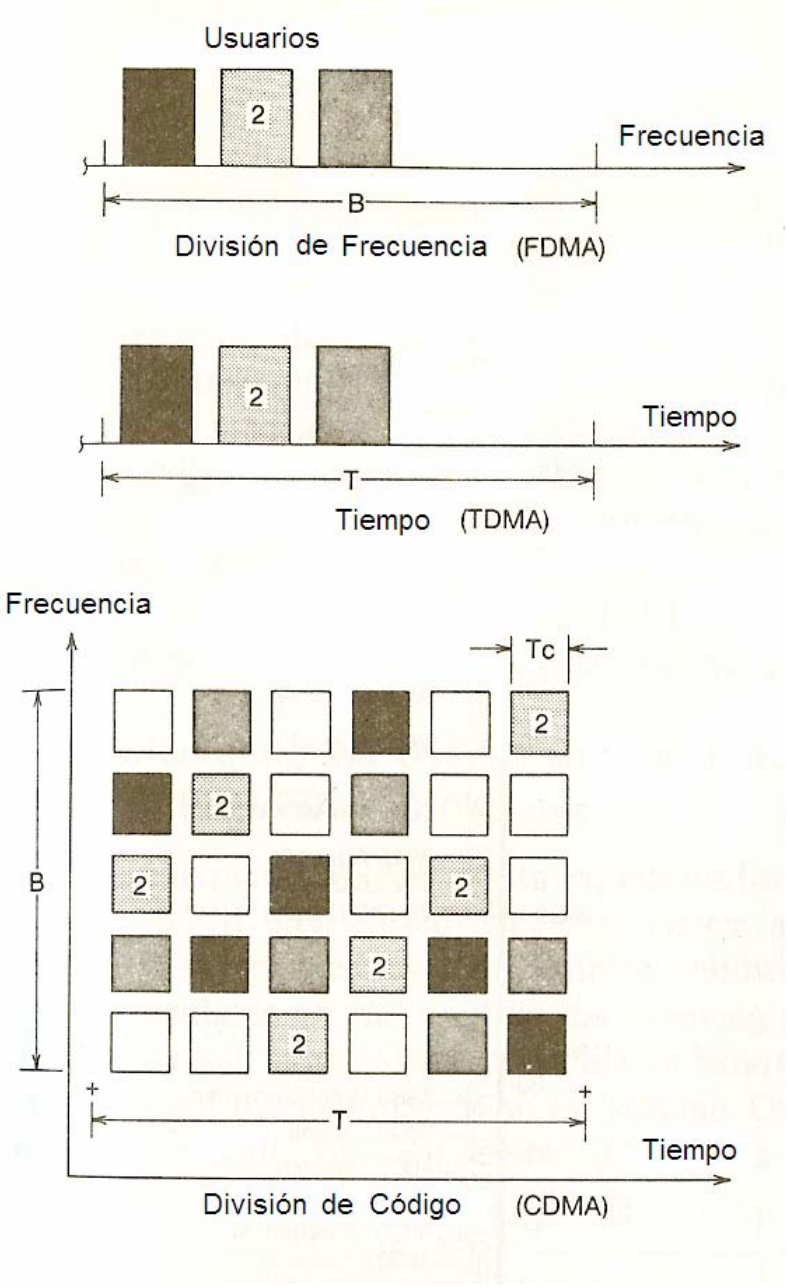


Figura 4.2 Técnicas de acceso múltiple

Acceso múltiple por división de tiempo (**TDMA**), en la que los usuarios transmiten en turnos en sus propias ranuras (***slots***) de tiempo. Mientras se lleva a cabo la transmisión, cada usuario tiene uso exclusivo de uno o más transpondedores. Por la naturaleza intermitente de **TDMA**, es utilizada en la modulación digital.

Acceso múltiple por división de código (**CDMA**), en la que simultáneamente varias estaciones terrenas transmiten de manera ortogonal señales codificadas que ocupan la misma banda de frecuencia. Sistemas decodificadores reciben la transmisión combinada de diferentes estaciones y recuperan una de ellas.

4.5.1 Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA)

En el acceso múltiple por división de tiempo, cierto número de estaciones terrenas se turnan para transmitir ráfagas a través de un transpondedor común. **TDMA** tiene todas las ventajas que la transmisión digital ofrece sobre la analógica.

Este tipo de acceso es resistente al ruido y a la interferencia, se reconfigura fácilmente si existen cambios en la demanda de tráfico, combina tráfico de voz con tráfico de datos, entre otras. Una característica única que este tipo de acceso proporciona a los sistemas satelitales es que permite que un **TWT** (***Traveling Wave Tube***) del transpondedor trabaje cerca del nivel de saturación, es decir, la potencia de salida es aprovechada al máximo y como consecuencia maximiza el enlace de bajada, y las estaciones terrenas son beneficiadas.

Cada estación **TDMA** debe saber cuando transmitir y también debe recuperar la portadora y los pulsos para cada una de las ráfagas recibidas en tiempo, y de esta manera escoger los canales de bandabase deseados.

En la figura 4.3 se ejemplifica un sistema **TDMA**, en la que un grupo de estaciones terrenas a diferente distancia del satélite cada una de ellas, deben transmitir ráfagas de energía RF, de tal manera que esas ráfagas lleguen al satélite en un orden preestablecido.

Dichas estaciones tienen que ajustar sus respectivas transmisiones con el objeto de compensar las variaciones que puedan presentarse dentro del rango del satélite, y algo sumamente importante, deben tener la capacidad de entrar o dejar la red sin causar alteraciones o interrupciones en la misma.

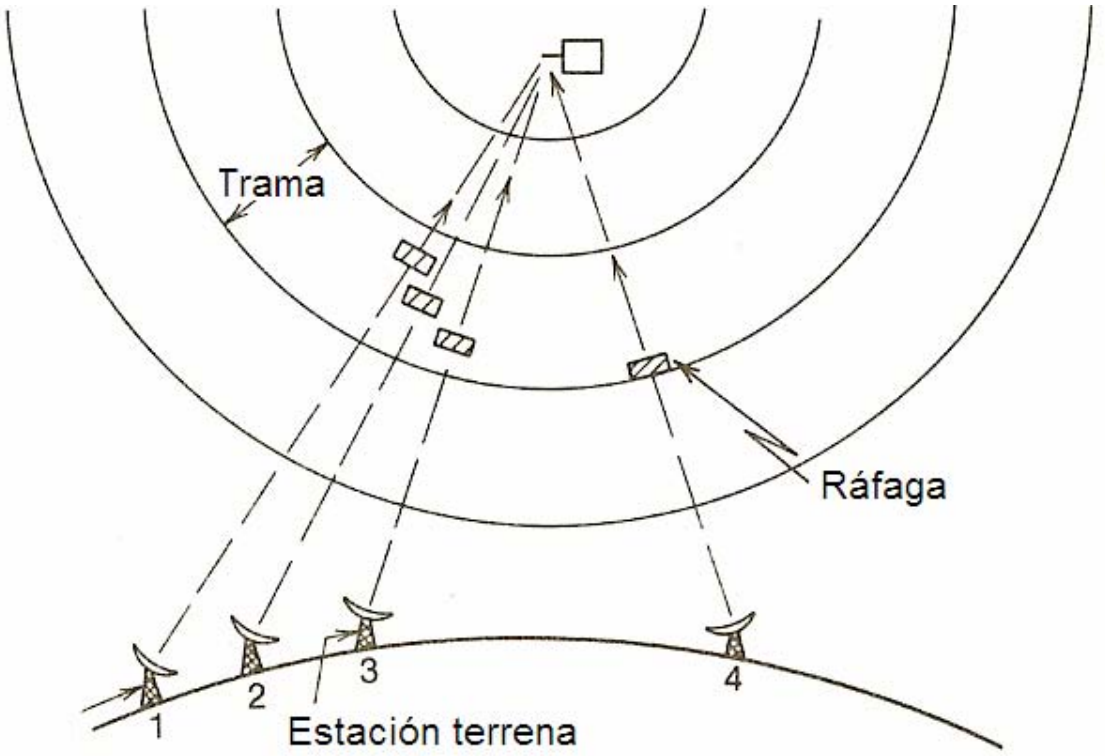


Figura 4.3 Red de estaciones terrenas en una red TDMA

Las transmisiones **TDMA** se organizan de la siguiente manera: las estaciones terrenas transmiten, de manera discontinua durante un período de tiempo T_B , ***ráfagas*** que son insertadas en una estructura de tiempo más larga de duración T_F que es llamado período de la trama, el cual corresponde al tiempo en el cual todas las estaciones transmiten. Las ráfagas son de hecho la transferencia de tráfico que transmiten las estaciones, y cada una de éstas ocupa todo el ancho de banda del canal en lapsos de tiempos específicos.

La estación terrena recibe información binaria a una velocidad R_b desde la red o desde la interfase del usuario. Dicha información debe ser almacenada en una memoria, ya que debe esperar el tiempo asignado para ser transmitida. Llegado el momento, el contenido de la memoria es transmitido en el intervalo de tiempo llamado T_B.

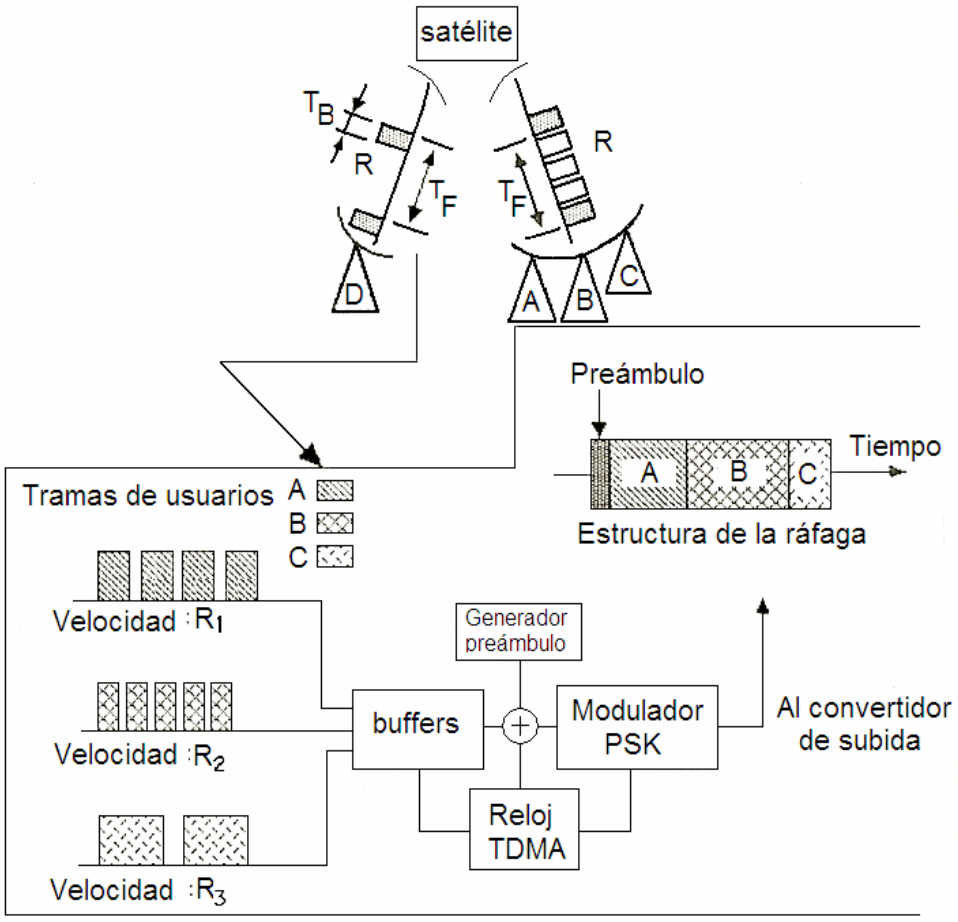


Figura 4.4 Generación de la ráfaga

Como puede apreciarse en la figura 4.4, cada una de las ráfagas contiene una cabecera o preámbulo y un campo de tráfico. A continuación se describen las funciones que tiene dicho preámbulo:

- Permitir al demodulador de la parte receptora recuperar la portadora generada por el oscilador local de la parte transmisora. Para lograr esto, en el preámbulo se inserta una secuencia de bits para mantener la fase de la portadora.

- Permitir al detector de la estación terrena receptora realizar la sincronización entre su reloj de bit y la velocidad de los símbolos.
- Permitir a la estación terrena detectar el comienzo de la ráfaga por medio de una serie de bits llamados "***palabra única (UW)***". La palabra única sirve para marcar cada trama y son cadenas de 20 o 48 bits, por ejemplo 0111 1010 110 1101 0000. Al final del enlace receptor, los bits de entrada son llevados a un registro, en el cual son comparados con los bits que se almacenaros previamente para verificar si corresponden con la palabra única esperada. Si los bits en el registro corresponden con los de la memoria, se produce un pulso de máximo voltaje de salida. Por cada par de bits que no corresponde, la amplitud de salida es reducida. Dependiendo de la tolerancia del sistema **TDMA**, puede aceptar como correcta la palabra única recibida aunque no sea del todo igual, pero sin rebasar un cierto número de bits.
- Permitir la transferencia de mensajes entre las estaciones y señalización.

El campo de tráfico se encuentra al final del preámbulo y se define como la parte en donde se encuentra toda la información útil. Las tramas contienen ráfagas de referencia o de supervisión, con el objeto de establecer tiempo absoluto para la red. Cada estación transmite una por trama y de esta manera sus ráfagas comienzan a ser transmitidas por el satélite en un intervalo de tiempo específico, antes o después de una ráfaga de referencia. En la figura 4.5 puede apreciarse un ejemplo de esto.

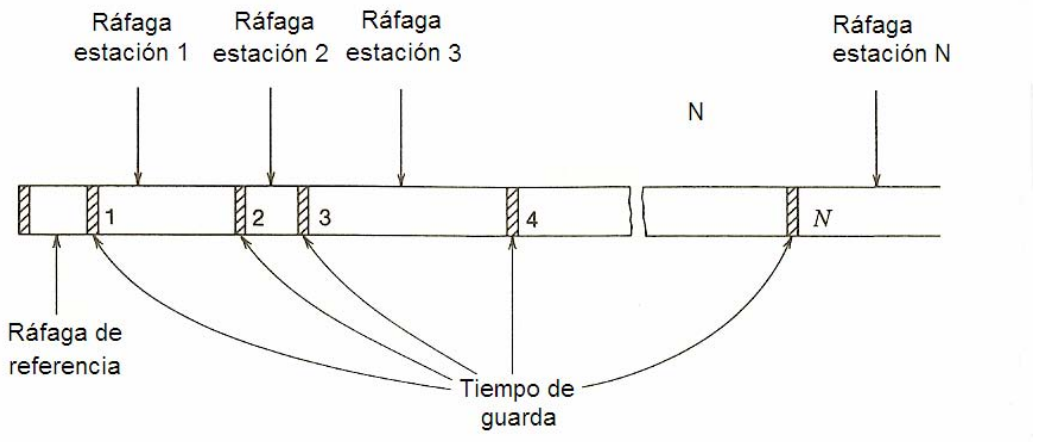


Figura 4.5 Estructura trama TDMA

Las tramas se forman a nivel satelital y están formadas por todas las ráfagas que son transmitidas por las estaciones terrenas una seguida de la otra. Para poder compensar errores en la sincronización hay un período de tiempo en el cual no hay transmisión, llamado tiempo de guarda, que tiene una duración de 1 microsegundo y se localiza entre cada una de las ráfagas. En la figura 4.6 se muestra un ejemplo de la estructura de una trama, la cual tiene una duración de 2 ms.

En la misma figura se muestran dos tipos de ráfagas, unas con una cabecera de 280 símbolos y un campo tráfico en múltiplos de 64 símbolos de acuerdo con la capacidad de cada una de las estaciones; y otras que son las de referencia, con una cabecera de 288 símbolos y no tiene campo de tráfico, los cuales son generados desde estaciones de control terrenas, que son tratadas como si fueran originadas por el satélite.

Para canales de voz digital a una tasa de transmisión r_{sp}, el número de canales de voz, *n*, que pueden transmitirse en TDMA compartidos por un número de estaciones *N* pueden calcularse por medio de la duración de la trama, T_{frame}, el tiempo de guarda y del preámbulo y la tasa de bit de transmisión del sistema TDMA, R_b, como se muestra en la ecuación 4-3:

$$T_d{}^{3} = [T_{frame} - N\,(t_g + t_{pre}) / N] \quad [s] \tag{4.3}$$

En 1 segundo, el número total de bits, C_b, transmitidos por cada una de las estaciones terrenas es:

$$C_b{}^{3} = (T_d)\,(R_b) / T_{frame} \tag{4.4}$$

Como cada canal digital de voz requiere una tasa de bit r_{sp} [bps], el número total de canales de voz, *n*, transmitidos por cada estación terrena es:

$$n^{3} = C_b / r_{sp} \tag{4.5}$$

[3] *Pratt, Timothy, Bostian, Charles W., **Satellite Communications**, John Wiley & Sons, 2ª ed., 2003, pág 237*

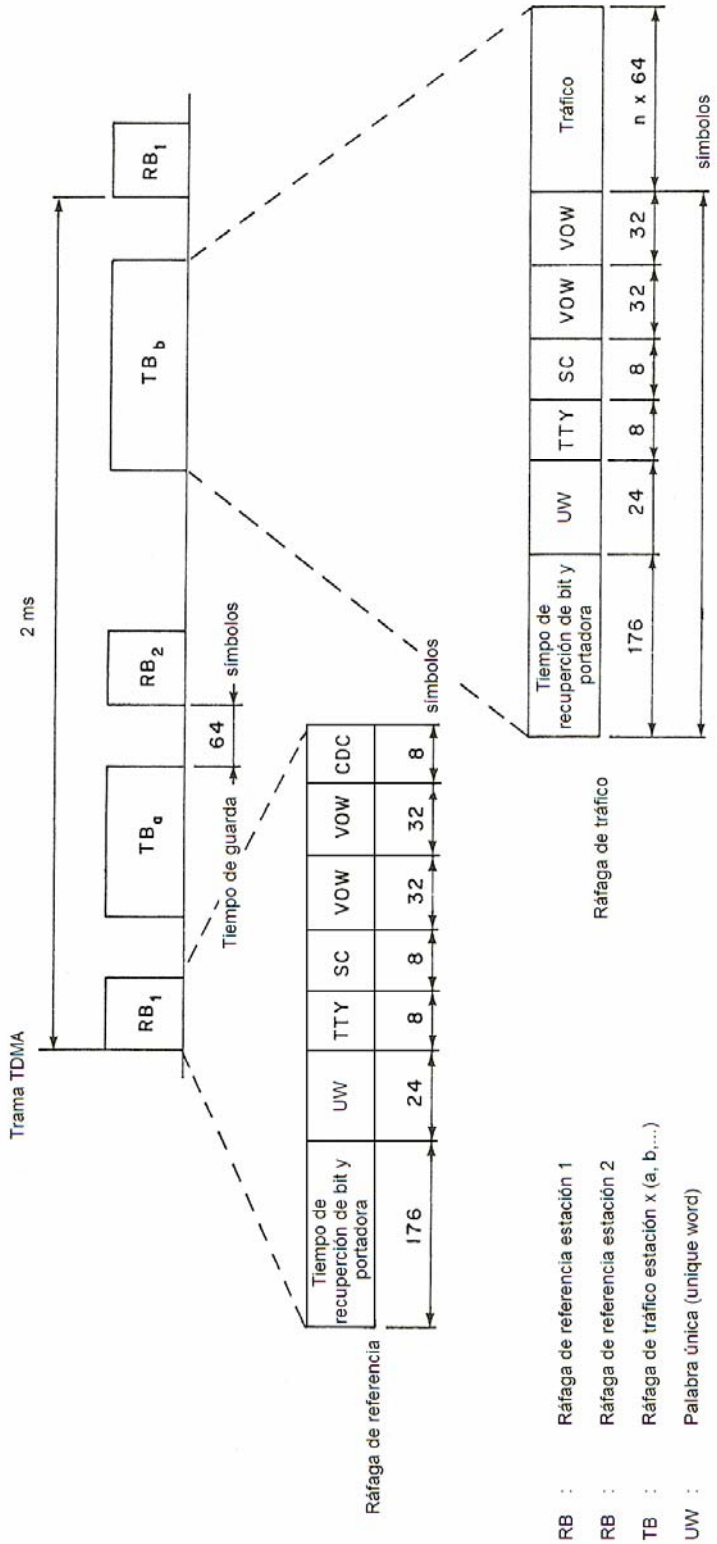


Figura 4.6 Estructura de la trama

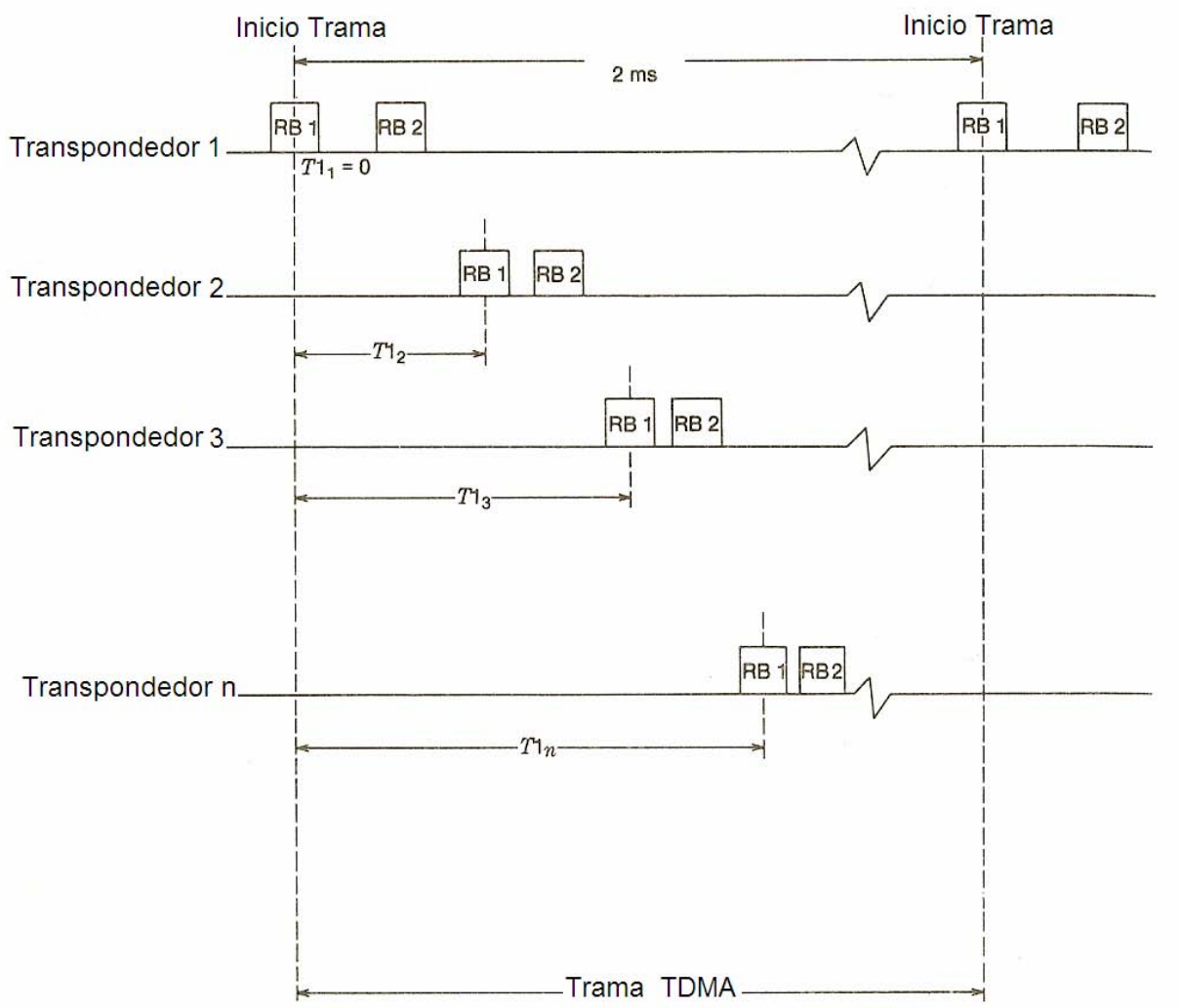


Figura 4.7 Estructura de la trama en una comunidad de transpondedores

Una estación terrena puede transmitir o recibir de distintos transpondedores, lo que significa que todos los transpondedores a través de los cuales una estación recibe o transmite deben estar sincronizados, es decir, sus tramas deben iniciar y terminar al mismo tiempo, lo que se conoce como ***comunidad de transpondedores.***

Uno de los transpondedores de esta comunidad es conocido como el ***transpondedor de referencia de tiempo (TRT, Time Reference Transponder)*** y su primera ráfaga de referencia marca el ***comienzo de la trama (SOF, Start of Frame)*** para todos los demás integrantes de esta ***comunidad***. Como se ve en la figura 4.7 las ráfagas de referencia de los

demás transpondedores comienzan a ser enviadas en determinados intervalos de tiempo (***T1***$_i$).

El tiempo de transmisión asignado a cada estación no es necesariamente igual para todos, debido a que puede haber estaciones que llevan más tráfico que otras. Cuando los tiempos asignados son iguales o fijos para todas las estaciones, se tiene un acceso múltiple por división de tiempo con asignación fija, como en la figura 4.8, o bien, el tiempo de transmisión puede variar dependiendo del tipo de tráfico, como se aprecia en la figura 4.9, y si este es el caso, debe reorganizarse la estructura de la trama y la distribución de los tiempos de la misma.

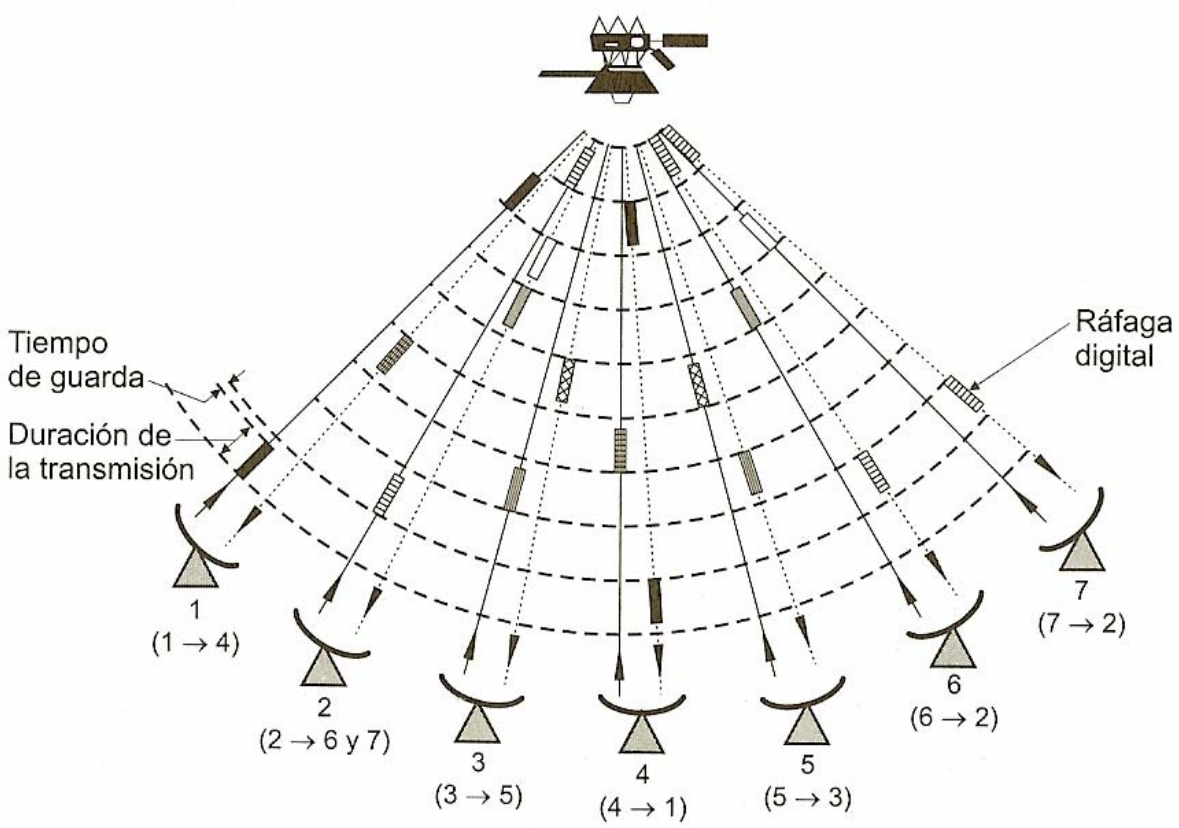


Figura 4.8 TDMA asignación fija y tiempos iguales de transmisión

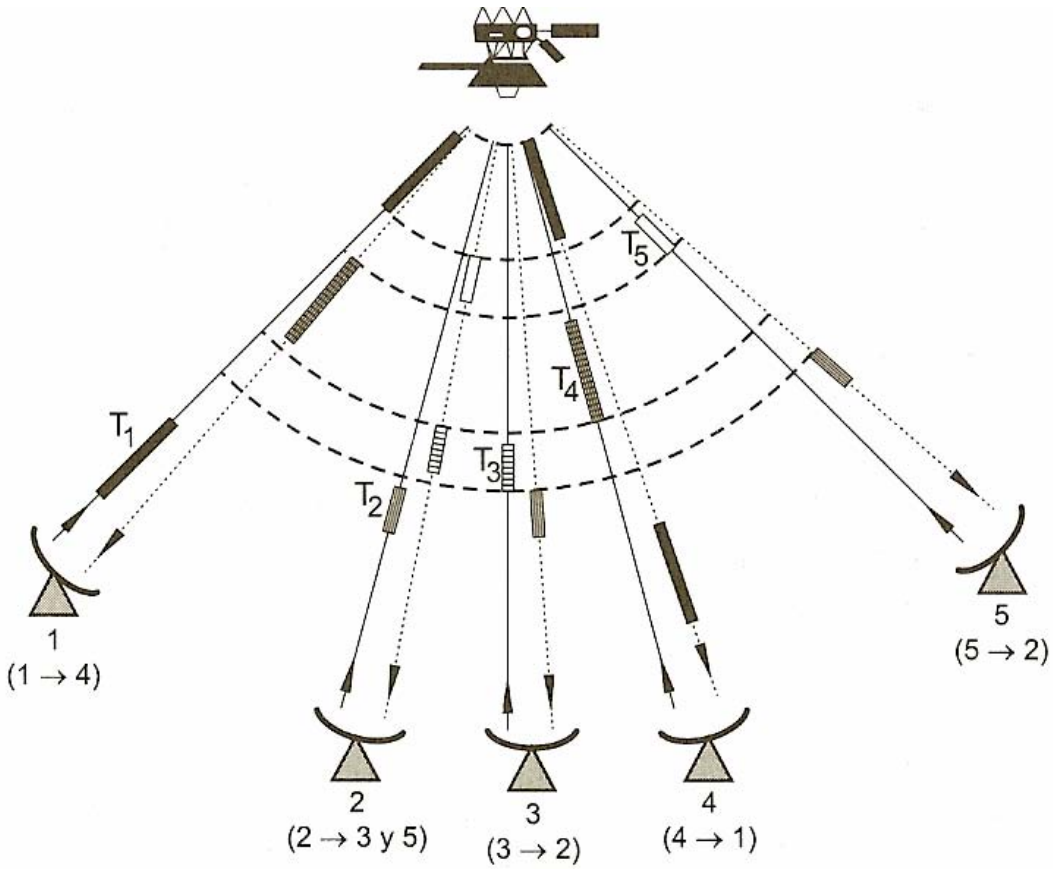


Figura 4.9 TDMA asignación fija y tiempos desiguales de transmisión

4.5.2 Acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA)

En este tipo de acceso, un grupo de estaciones terrenas transmite señales hacia el satélite para ser transmitidas a diferentes estaciones terrenas. A cada una de las señales transmitidas se le asigna una determinada frecuencia dentro del ancho de banda disponible del satélite, como se muestra en la figura 4.10, y todo el espectro de frecuencia a la entrada del satélite es trasladado a frecuencias de recepción. Posteriormente, la estación receptora recibe una determinada señal por medio de la sintonización y filtración de la banda adecuada en el espectro de recepción.

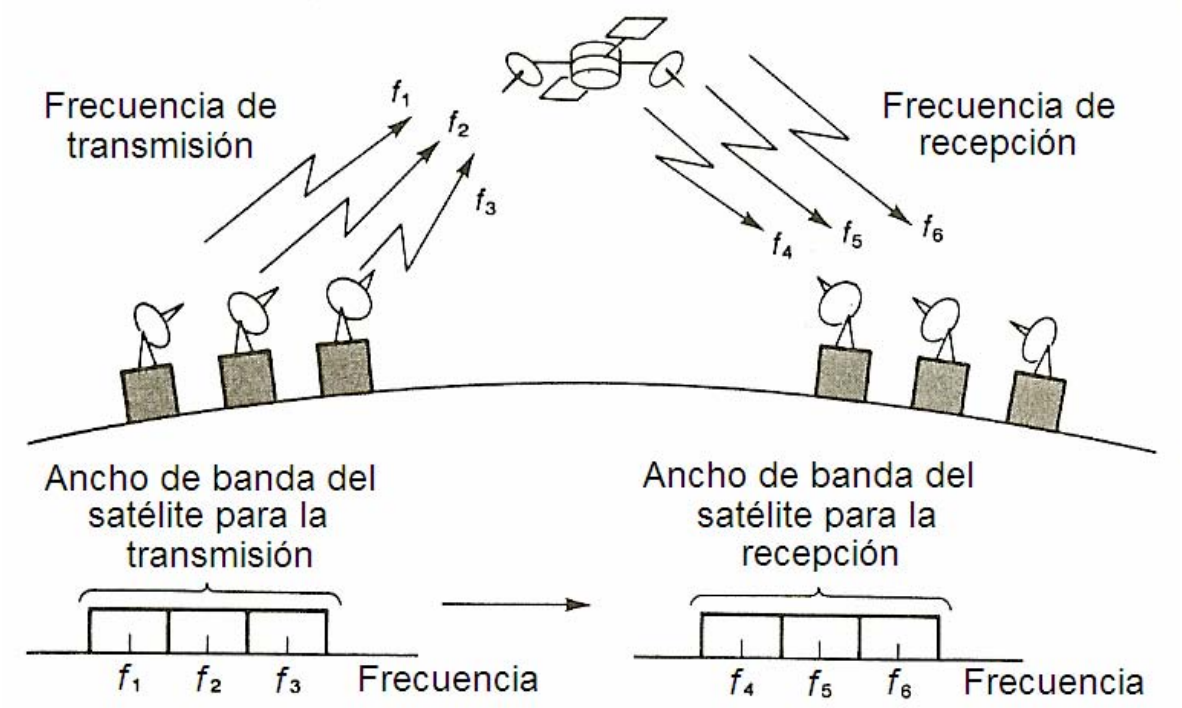


Figura 4.10 Sistema FDMA

Cada portadora puede originarse desde una estación terrena diferente, o varias portadoras pueden ser transmitidas desde una misma estación. La selección de la banda de frecuencias puede ser fija o asignada. Cuando es frecuencia fija, a cada portadora se le asigna una banda de frecuencia dedicada para el enlace de subida y ninguna otra portadora puede utilizarla.

En el otro caso, se utiliza el acceso múltiple por división de frecuencia con asignación por demanda o **DAMA** por sus siglas en inglés (***Demand Assigned Multiple Access***), en el cual las bandas de frecuencia se comparten entre diferentes portadoras, es decir, una banda de frecuencia en particular es asignada en el tiempo en que se requiera, dependiendo de la disponibilidad.

El ancho de banda disponible se divide en sub-bandas, cada una de éstas es asignada a las portadoras que son transmitidas por la estación terrena. Con este tipo de acceso, las

estaciones transmiten de manera continua y el canal transmite diferentes portadoras de manera simultánea en diferentes frecuencias.

Previniendo imperfecciones en los osciladores y en los filtros, es necesario tener tiempos de guarda entre cada una de las portadoras, como se muestra en la figura 4.11. El receptor selecciona la portadora correcta de acuerdo con la frecuencia apropiada y el amplificador de frecuencia intermedia se encarga de la filtración.

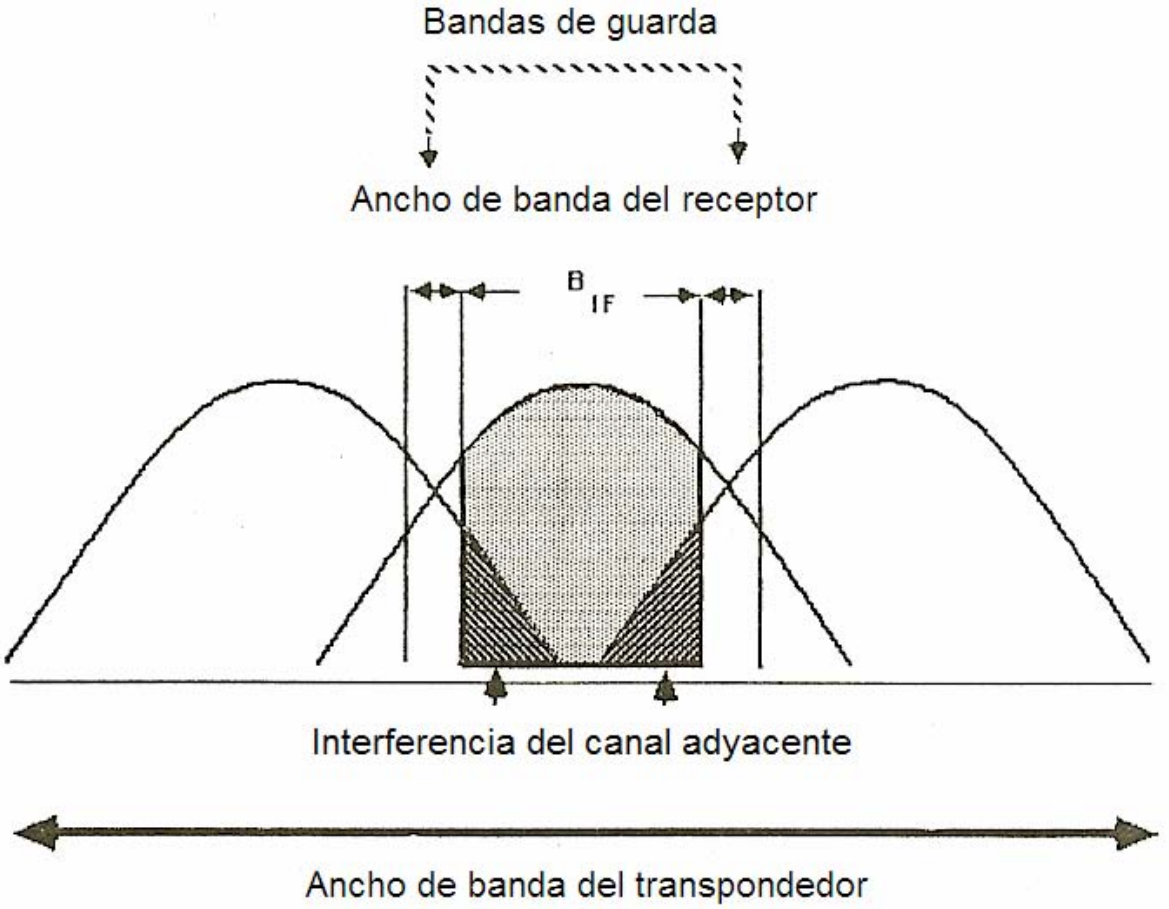


Figura 4.11 Espectro de un transpondedor FDMA

Parte de la potencia de una portadora adyacente a otra en particular será capturada por el receptor que está sincronizado a la frecuencia de la portadora que se desea recibir, lo que trae como consecuencia ruido debido a la interferencia llamada interferencia del canal adyacente (***ACI, Adjacent Channel Interference***), por sus siglas en inglés.

4.5.3 Acceso múltiple por división de código (CDMA)

En este tipo de acceso, un cierto número de usuarios ocupa todo el ancho de banda del transpondedor todo el tiempo. Estas señales están codificadas con el propósito de que la información del transmisor pueda ser recuperada sólo por la estación terrena que se encuentre sincronizada y que conozca el código utilizado, lo que provoca una red satelital descentralizada ya que sólo un par de estaciones son las que tienen que coordinar sus transmisiones.

Las estaciones que usan este tipo de acceso pueden utilizar un transpondedor en el momento en que lo requieran sin necesidad de sincronizar su frecuencia (**FDMA**) o tener tiempos asignados (**TDMA**). Cada una de las estaciones terrenas receptoras cuenta con su propio código, es cual es llamado “dirección” y por otro lado, la estación transmisora modula la señal que va a transmitir a la dirección de la estación receptora adecuada.

El acceso **CDMA** prácticamente sólo es utilizado para propósitos militares, ya que son varios grupos pequeños que se comunican esporádicamente en intervalos de tiempo muy amplios, a diferencia de los sistemas satélites comerciales que transmiten grandes cantidades de información de manera continua.

En la figura 4.12 se ejemplifica el acceso **CDMA** que, como se dijo anteriormente, la estación o estaciones receptoras deben conocer el código de transmisión para poder reconstruir el mensaje original, aunque la información sea recibida de todos los demás mensajes que fueron transmitidos al mismo tiempo.

Este tipo de acceso funciona con el principio de espectro expandido, y recibe este nombre al requerir a la transmisión del código, en combinación con la información útil, un ancho de banda mucho mayor. El receptor reduce el ancho de banda de la portadora al ancho de banda original y recupera sólo la información útil.

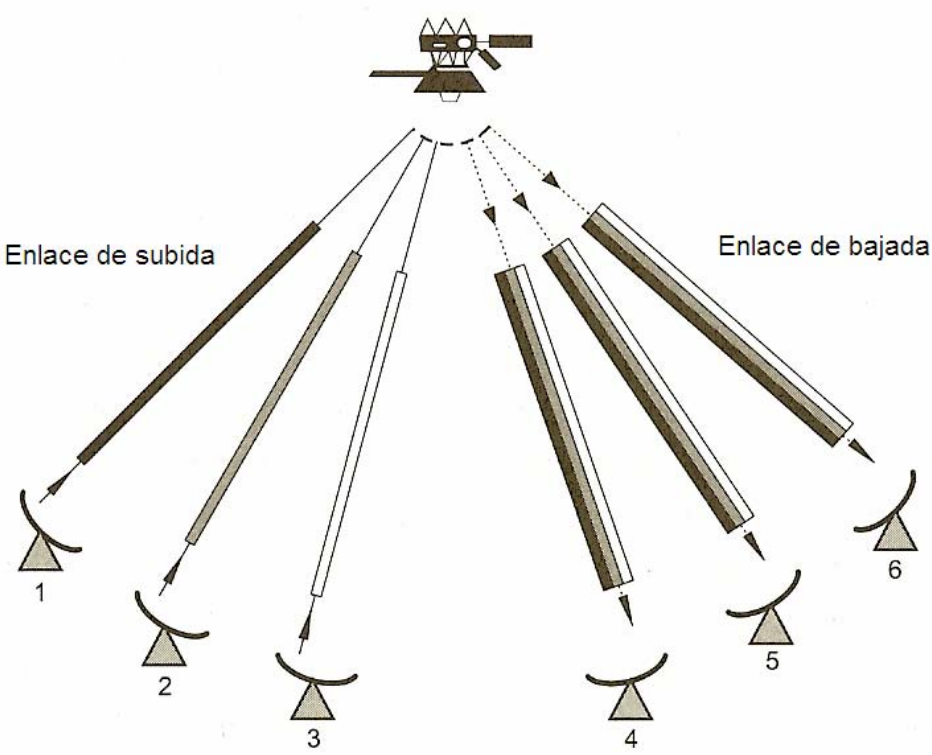
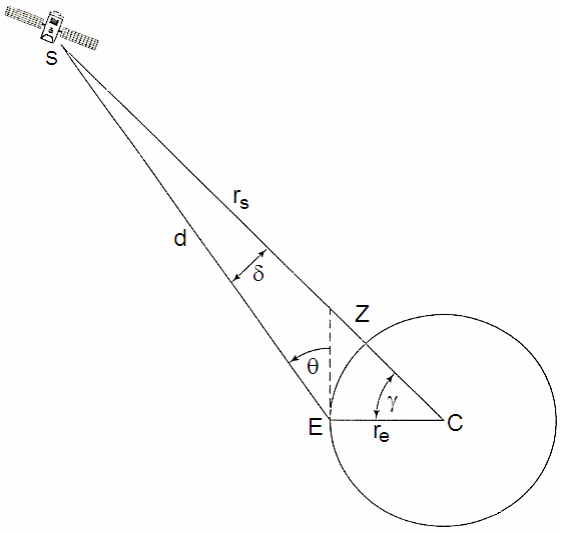


Figura 4.12 Sistema CDMA

En el acceso por división de código la operación es relativamente sencilla, ya que no requiere sincronización entre las estaciones, únicamente la de la estación receptora de la portadora. Esto ofrece protección en contra de otros sistemas, aunque se utiliza un ancho de banda muy grande del segmento espacial.

CAPÍTULO V

APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE LOS SATÉLITES DE ÓRBITA BAJA



5.1 Diseño de un sistema satelital de órbita baja

En la ingeniería de los satélites, como en cualquier otra área de la Astronáutica, confluyen múltiples aspectos. No sólo se trata de construir una máquina, sino también de conseguir que, a pesar de sus delicados elementos electrónicos, sea capaz de resistir la presión de un lanzamiento y, sobre todo, funcionar en el ambiente del espacio, donde las temperaturas oscilan entre los 200° C bajo cero durante períodos de sombra y 200° C a la luz del Sol.

El diseño de los satélites ha evolucionado desde aquellos años del Sputnik I hasta la actualidad; sin embargo, su razón de ser sigue siendo la misma, así como de la mayor parte de sus elementos. El paso del tiempo y los logros en las tecnologías han proporcionado instrumentos más precisos, sistemas de provisión de energía eléctrica más potentes y componentes de menor peso, pero todos ellos, en esencia, no han cambiado mucho.

Después de haber revisado el marco teórico de los satélites de órbita baja, a continuación daremos paso a la parte práctica de los mismos. Revisaremos ejemplos prácticos acerca de algunas de las técnicas de acceso que se manejan en este tipo de satélites y un diseño sencillo de una constelación satelital, de acuerdo con ciertos parámetros que requieren ser cubiertos, ya que así fue establecida la arquitectura del sistema.

Para comenzar podemos decir que, por ejemplo, un transbordador espacial puede considerarse como ejemplo de un satélite de órbita baja. Algunas veces, orbita a una altura de 250 km sobre la superficie de la Tierra. Considerando el radio de la Tierra como 6378 km, podríamos calcular el período de la órbita del trasbordador y una vez obtenido este dato podremos calcular la velocidad del mismo.

Para poder llevar acabo esto, es necesario calcular el radio de la órbita del trasbordador por medio de la siguiente suma

$$r_e + h$$

$$6378 \text{ km} + 250 \text{ km} = 6628 \text{ km}$$

En donde,

r_e = radio de la Tierra 6378 km

h = altura a la cual se encuentra el satélite

Ahora, es importante mencionar un concepto fundamental para realizar cálculos de diseño, **el período orbital T**[1], el cual se define como el tiempo que tarda un satélite en completar una vuelta sobre su trayectoria, y esta dado por:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\mu}} a^{3/2} \qquad (5.1)$$

En donde,

μ = a la constante de Kepler 3.986004418 x 10^5 [km^3 / s^2]

a = es el semieje mayor en una órbita elíptica o el radio en una órbita circular

Elevando esta ecuación al cuadrado se obtiene:

$$T^2 = (4\pi^2 a^3) / \mu. \qquad (5.2)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 5.2 se obtiene lo siguiente:

$$T^2 = [4\pi^2 (6628 \text{ km})^3] / 3.986004418 \times 10^5 \text{ km}^3 / \text{s}^2$$

$$T^2 = 2.884 \times 10^7 \text{ s}^2 = 5370.3 \text{ s}$$

Por lo tanto, el período orbital es aproximadamente igual a T = 5370.3 s = 89 min 30 s

Cuando un satélite se encuentra orbitando a baja altura, la fricción con la atmósfera de la Tierra es un factor de gran importancia, ya que provoca que la velocidad del satélite disminuya, y como consecuencia caerá a la Tierra.

---

[1] *Sheriff, Ray E., Fun Hu Y.,* ***Mobile Satellite Communication Networks****, John Wiley & Sons, 2001, pág 88*

A continuación, será revisado el diseño de una constelación satelital que requiere cierta compañía, al igual que la explicación punto por punto. Una compañía desea desarrollar una constelación de satélites de órbita baja que dé cobertura global continua.

Las restricciones que se considerarán para el diseño son: altura orbital sobre la superficie de la Tierra de 750 km debido a la potencia de la terminal de usuario, no hay afectación para el usuario mientras las baterías se estén cargando y el satélite tiene las capacidades del vehículo de lanzamiento. Para llevar acabo el diseño de esta constelación, se requiere saber la siguiente información:

- La longitud del arco de cobertura sobre la superficie de la Tierra;
- La ganancia de la antena del satélite, si sólo un haz ilumina esta cobertura;
- El número de satélites que se requieren para completar un plano
- El número de satélites que se requieren para completar un sistema global.

Longitud del arco de cobertura. En la figura 5.1, se ilustra la geometría de un satélite y su respectiva terminal de usuario.

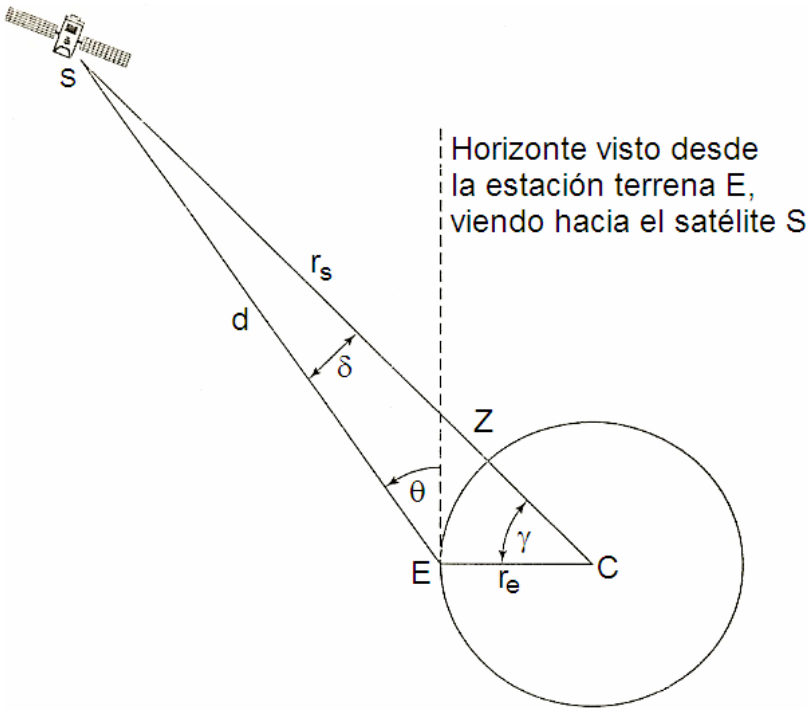


Figura 5.1 Geometría para calcular áreas de cobertura

El satélite, la estación terrena y el centro de la Tierra se encuentran en el mismo plano en la figura. *SCE* es el ángulo principal, γ, y el ángulo de elevación, θ, es el ángulo entre el horizonte y el satélite con respecto a la estación terrena. La línea *SC* une al satélite con el centro de la Tierra y corta la superficie de ésta en el punto Z. El satélite se encuentra a una distancia d de la estación terrena y a una distancia r_s del centro de la Tierra. El radio de la Tierra se representa por r_e, el cual podrá considerarse como 6370 km.

Para propósitos del diseño, si se establece un ángulo mínimo de elevación de 10°, la manera en que podemos calcular la altura orbital r_s es la siguiente:

$$r_s = r_e + 750\ km,$$
$$r_s = 6378\ km + 750\ km$$
$$r_s = 7128\ km$$

En donde r_e es el radio promedio de la Tierra, que es 6378 km, y $\theta = 10°$. Se necesitará encontrar el ángulo central γ de la figura 5.1 que permitirá encontrar la longitud de la mitad del arco debajo del arco de cobertura *EZ.* El siguiente paso será utilizar la ley de senos, y se tendrá:

$$\text{sen } (\delta)/r_e = \text{sen (ángulo SEC)}/r_s$$

En donde, el ángulo SEC = $\theta + 90° = 100°$ y haciendo las operaciones respectivas, se obtiene como resultado $\delta = 61.79°$. Entonces, como la suma de los ángulos internos de un triángulo es 180°, se obtiene: $\gamma = 180 - 100 - 61.79 = 18.21°$

Por lo tanto, para determinar el arco de cobertura *EZ*, primero debemos convertir el ángulo γ en radianes y el resultado multiplicarlo por el radio promedio de la Tierra: $(r_e)\ (\gamma)$ = (6378 km) (0.3178 rad) = 2027.1 km. Por lo tanto, el diámetro instantáneo de cobertura es: (2) (2027.1km) = 4054 km y el ángulo de cobertura medido al centro de la tierra es $2(\gamma)$ = 36.42°.

Ganancia de la antena del satélite. El ángulo δ de la figura 5.1 es la mitad del ancho del haz de la antena. El ángulo completo de éste al satélite será 2δ = (61.79°) (2) = 123.6°. La ganancia[2] de la antena puede ser relacionada entonces al ancho del haz de 3-dB, usando la siguiente relación:

$$G= 33000/(\theta_{3db})^2$$

En donde θ_{3db} es el ancho del haz en grados y la ganancia no está en decibeles. Lo que nos da: $G = 33000/(123.6°)^2 = 2.16$ que convirtiéndolo a dB obtenemos:

$$10 \log G = 10 \log (2.16) = 3.3 \text{ dB}.$$

La cobertura de un satélite que se encuentra orbitando a una altura de 750Kms, se muestra en la figura 5.2.

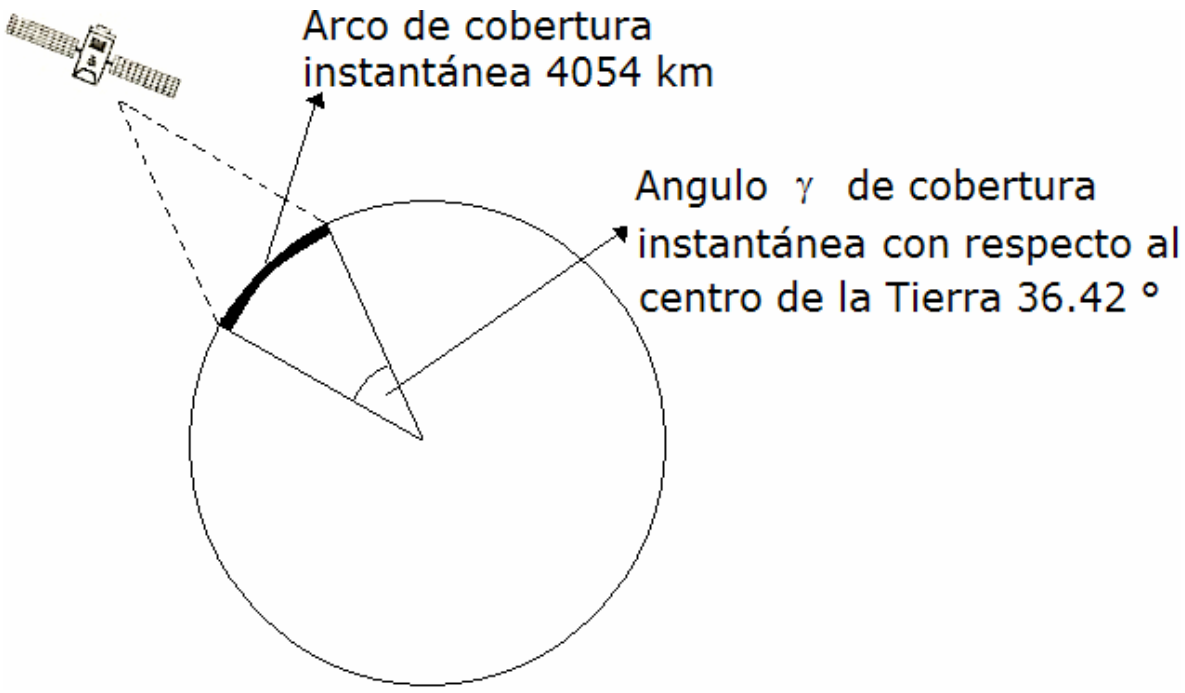


Fig. 5.2 Cobertura del satélite

[2] *Pratt, Timothy, Bostian, Charles W.,* ***Satellite Communications****, John Wiley & Sons, 2ª ed., 2003, pág 82*

El arco de cobertura ha sido calculado para que sea igual a 4054 km, con un ángulo mínimo de elevación de 10°. El ángulo al centro de la tierra γ es 36.42°. Para obtener una cobertura global, usando este tipo de configuración satelital, serían requeridos 360/36.42 satélites, lo que nos da aproximadamente 10 satélites por plano.

Como se puede apreciar en la figura 5.2, sabemos que cada uno de los satélites cubrirá 36.42 / 360 = 0.1 de la circunferencia de la Tierra y será necesario tener un mínimo de 10 satélites en cada plano para completar cobertura global, por ejemplo, alrededor del ecuador. Si como mínimo se requieren 10 satélites en cada plano, por lo tanto, el total necesario para completar cobertura global será de 5 planos ya que, considerando una órbita polar, habrá satélites en ambos hemisferios de la Tierra, algunos en dirección norte y otros en dirección sur, por lo cual habrá diez "franjas" alrededor de la Tierra como resultado de los 5 planos satelitales. Por lo tanto, el número total mínimo de satélites necesarios será 50.

Este es sólo un número mínimo de satélites, ya que hay que tomar en cuenta los espacios potencialmente existentes en donde no hay cobertura, y también será necesario tener satélites de reserva dentro de la constelación, por las fallas que puedan presentarse.

Capacidad de un canal utilizando Acceso Múltiple por División de Frecuencia

Para este mismo diseño, supongamos que un gran número de teléfonos satelitales pueden acceder a un sólo transpondedor en un satélite de órbita baja usando FDMA. La información transmitida desde el satélite hacia el teléfono es utilizada para fijar la frecuencia de transmisión y la potencia de salida del teléfono satelital.

Los teléfonos transmiten señales BPSK en la banda L con un ancho de banda de 12 KHz y un nivel de potencia de salida entre 0.05 y 0.5 W, para que el nivel de potencia a la entrada del transpondedor sea siempre de -144 dBW para cualquier señal transmitida hacia el satélite. La relación señal a ruido ***C/N*** resultante en condiciones de cielo despejado para cualquier señal en el transpondedor es de 16dB.

Cuando la relación ***C/N*** es especificada para el transpondedor, el cálculo de la potencia es directo. Para este caso, sea $(\boldsymbol{C/N})_{up}$ la relación señal a ruido en el transpondedor[3]. Este tiene un ancho de banda de 1.0 MHz, una ganancia de 134 dB y un máximo de potencia de salida de 5 W. Las frecuencias centrales de los transmisores del teléfono tienen un espacio de 16 KHz entre ellas para obtener una banda de guarda de 4 KHz entre cada señal.

Para determinar el número máximo de teléfonos satelitales que pueden acceder simultáneamente al transpondedor y si la potencia de éste o el ancho de banda están limitados. Ahora, si el transpondedor tiene límite de potencia ¿qué cambio se puede hacer para incrementar el número de señales que pueden entrar al transpondedor?

Si el transpondedor tiene ancho de banda limitado, el número máximo de señales, N_{max}, que puede llevar puede obtenerse dividiendo el ancho de banda disponible entre la suma del ancho de banda de la señal y el ancho de la banda de guarda.

$$N_{max} = 1000 \text{ KHz} / 16 \text{ KHz} = 62$$

El valor de N_{max} debe ser redondeado al número entero siguiente más bajo porque no se puede enviar fracciones de señal. El nivel de potencia de cada señal a la entrada del transpondedor es -144 dBW. La ganancia del transpondedor es de 134 dB, así que la potencia de salida de cada señal es

$$P_1 = -144 + 134 = -10 \text{ dBW} = 0.1 \text{ W}$$

Si tenemos 62 señales y cada una con un nivel de potencia de 0.1 W, la potencia total a la salida del transpondedor es 6.2 W. Esto excede la potencia máxima de salida permitida del transpondedor, la cual fue especificada a 5.0 W. Por lo tanto, el número máximo de teléfonos satelitales que pueden acceder simultáneamente al transpondedor es de 50, y el transpondedor tiene potencia limitada.

---

[3] *Pratt Timothy, Bostian, Charles W.,* ***Satellite Communications****, John Wiley & Sons, 2ª ed., 2003, pág 125*

Puede incrementarse el número de señales en el transpondedor a 62, el cual es el número máximo posible de teléfonos que pueden compartir el transpondedor al mismo tiempo debido al ancho de banda limitado. Reduciendo el nivel de potencia de entrada por medio de la siguiente relación[4]:

$$10\log_{10}(62/50) = 0.9 \text{ dB}$$

Entonces la potencia de salida desde del transpondedor, por señal, es

$$P_t = -144.9 + 134 = -10.9 \text{ dBW} = 0.081 \text{ W}$$

Ahora pueden transmitirse 62 señales desde el transpondedor con un nivel de potencia de salida total de (62) (0.081) = 5.0 W, que corresponde con el límite de potencia del transpondedor. La relación C/N en el transpondedor será reducido 0.9 dB, por que la señal de entrada es 0.9 dB más débil. Por lo tanto,

$$(C/N)_{up} = 16 - 0.9 \text{ dB} = 15.1 \text{ dB}$$

El transpondedor ahora transmite 0.9 dB menos de potencia por señal que lo especificado inicialmente, por lo que la relación $(C/N)_{dn}$ en la estación terrena receptora también se reducirá 0.9 dB.

TDMA en una red de estaciones fijas

Ahora, considérese el diseño de cinco estaciones terrenas TDMA que compartirán un sólo transpondedor equitativamente. La duración de la trama es 2 ms, el tiempo de preámbulo por estación es de 20 μs, y bandas de guarda de 5 μs entre ráfagas. Las ráfagas de transmisión son QPSK a 30 MBaudios.

[4] *Martin, James,* ***Communication Satellite Systems****, Prentice Hall, 1978, pág 100*

Para este diseño es necesario calcular:

- El número de canales de voz de 64kbps que cada estación TDMA puede transmitir, y
- La tasa de bit de transmisión de cada una de las estaciones terrenas en Mbps

Utilizando la ecuación:

$$T_d{}^{5} = [T_{frame} - N\,(t_g + t_{pre})] / N$$

Puede encontrarse la duración de la ráfaga de información para cada estación terrena, T_d, en microsegundos.

$$T_d = [2000 - 5(5 + 20)] / 5 = 375\ \mu s$$

La tasa de bit de transmisión de la ráfaga de 30 MBaudios es 30 millones de símbolos por segundo y los símbolos QPSK llevan 2 bits. Por lo tanto, la tasa de bit transmitida en cada ráfaga es R_b = (2 bits) (30 MBaudios) = 60 Mbps. La capacidad de cada estación terrena en bits por segundo es C_b* que puede ser calculada de la siguiente manera:

$$C_b{}^{5} = (T_d)(R_b) / T_{frame}$$

$$C_b = (375\ \mu s)\ (60 Mbps) / 2000\ \mu s = 11.25\ Mbps$$

Por lo tanto, el número de canales de voz digital de 64 kbps que pueden ser llevados por una estación terrena es:

$$n^{5} = C_b / r_{sp}$$

$$n = 11.25\ Mbps / 64\ kbps = 175.781$$

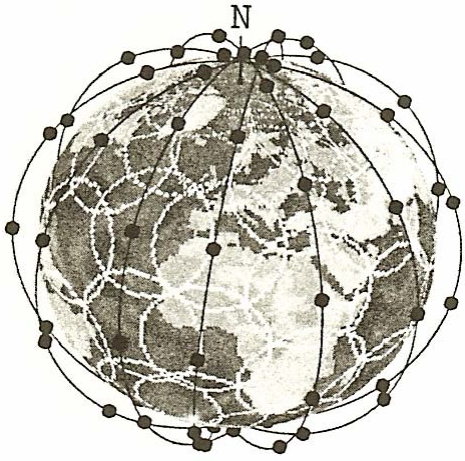
Se descarta el canal fraccional 0.781 porque sólo pueden enviarse canales de voz digital enteros. Esta fracción de canal de voz representa 50000 bits por segundo que no pueden ser transmitidos por cada estación terrena, o 100 bits por ráfaga. A una tasa de 60 Mbps, 100 bits es equivalente a 1.67 μs, por lo que el tiempo de guarda incrementaría de 5 μs a 6.67 μs cuando 175 canales de voz son enviados.

---

[5] *Pratt, Timothy, Bostian, Charles W., **Satellite Communications**, John Wiley & Sons, 2ª ed., 2003, pág 237*

CAPÍTULO VI

SISTEMAS SATELITALES QUE UTILIZAN SATELITES DE ORBITA BAJA



6.1 Iridium

El sistema Iridium está constituido por 12 *gateways* regionales que son operados por diferentes compañías encargadas de distribuir los servicios de este sistema. Dichos *gateways* se encuentran ubicados en distintas partes del mundo, como se explica a continuación:

- En Phoenix, Arizona se encuentra ubicada una estación, a través de la cual *Motorola, Sprint Iridium* e *Iridium Canada* proveen los servicios de este sistema en Estados Unidos y Canadá.
- En Moscú se encuentra ubicada otra estación, que abarca el área de la Federación Rusa y países colindantes. Las compañías encargadas de operar esta estación son *Khrunichev State Research and Production Space Center*.
- En Alemania se encuentra *Iridium Communications Germany*, que provee servicios en países como Alemania, España, Suecia, Inglaterra, entre otros.
- Iridium Italia e Iridium Alemania trabajan en conjunto para operar el *gateway* que se encuentra en Roma, el cual provee servicios a Italia, Francia, Grecia, Suiza y otros países europeos.
- *Nippon Iiridium* es el encargado de brindar servicios en Japón.

El sistema Iridium cuenta con 66 satélites distribuidos en 6 órbitas polares con 11 satélites en cada una de ellas, como se muestra en la figura 6.1, a una altura de 780 km con un ángulo de inclinación de 86.4° y 6 satélites de reserva. Las características principales de los satélites de este sistema son:

- Carga útil: 140 kg
- Masa del satélite en órbita 689 kg, que incluye 115 kg de combustible
- Estabilización triaxial
- Altura: 4.6 m
- Envergadura: 8.25 m
- Celdas solares: 1200 W
- Período orbital 1.7 h

- Potenica RF: 400 W
- 4 enlaces inter-satelitales por cada satélite.

Las terminales de usuario tienen un peso aproximado de 400 g, tiempo de duración de la pila 20 h (en stand by), tiempo de duración de llamada 2 h con el uso de la pila. Los suscriptores son identificados por medio de diferentes números:

- El número ISDN móvil de suscriptor Iridium (*MSISDN*), el cual contiene el código del país (8816 o 8817), el número de plan de área Iridium (*INPA*) de 3 dígitos, el número del proveedor de servicio de 2 dígitos, y el número de suscriptor.
- El número de ID móvil del suscriptor temporal (*TMSI*), que cambia periódicamente con el objetivo de proteger la confidencialidad de los suscriptores.
- El número de ID móvil del suscriptor Iridium (*IMSI*) que es un número permanente que es almacenado en la tarjeta SIM del suscriptor.

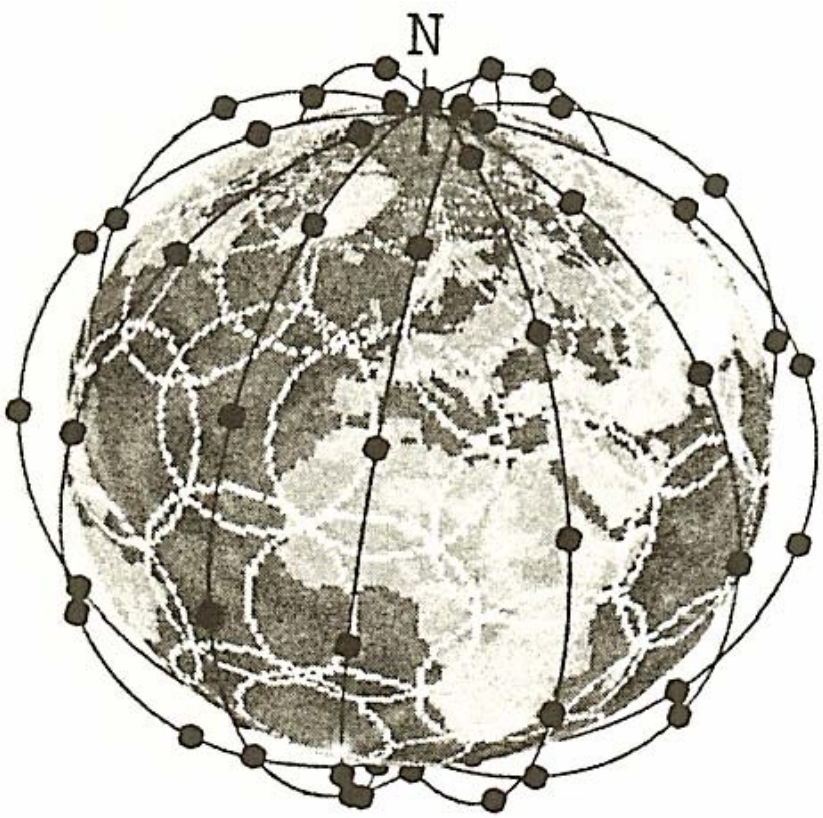


Figura 6.1 Sistema Satelital de Orbita Baja Iridium

Iridium utiliza frecuencias dentro de la banda S, de 1616.0 MHz a 1626.5 MHz. Las frecuencias utilizadas para los enlaces inter-satelitales se encuentran en el rango de frecuencias de la banda Ka, de 23.18-23.38 GHz, con un ancho de banda de 200 MHz. Los enlaces de alimentación también se encuentran dentro de la banda Ka, para el enlace que sube al satélite, las frecuencias utilizadas son 29.1-29.3 GHz

Los tipos de acceso a satélite utilizados por este sistema son: Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA) y Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA), con modulación QPSK a 2400 bits por segundo. Cada satélite proyecta 48 haces sobre la superficie de la Tierra (figura 6.2) y cuando estos se aproximan a los polos se enciman. Para evitar interferencia entre ellos, los haces que serán "apagados" son seleccionados. De hecho, no todos los haces están activos al mismo tiempo, sólo 2100 de 3168 están activos simultáneamente.

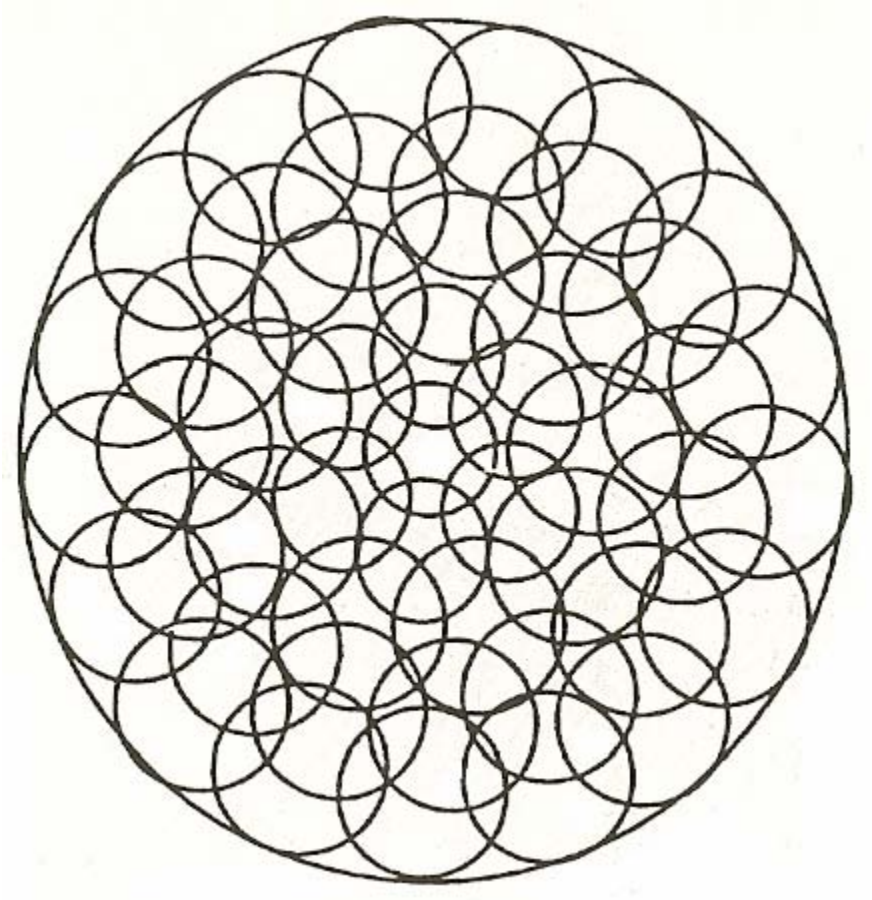


Figura 6.2 Organización de los haces que emite un satélite Iridium

En la figura 6.3 se muestra de manera general la arquitectura del sistema Iridium, que incluye el segmento satelital, el segmento terrestre y el segmento de usuario con diferentes tipos de terminales.

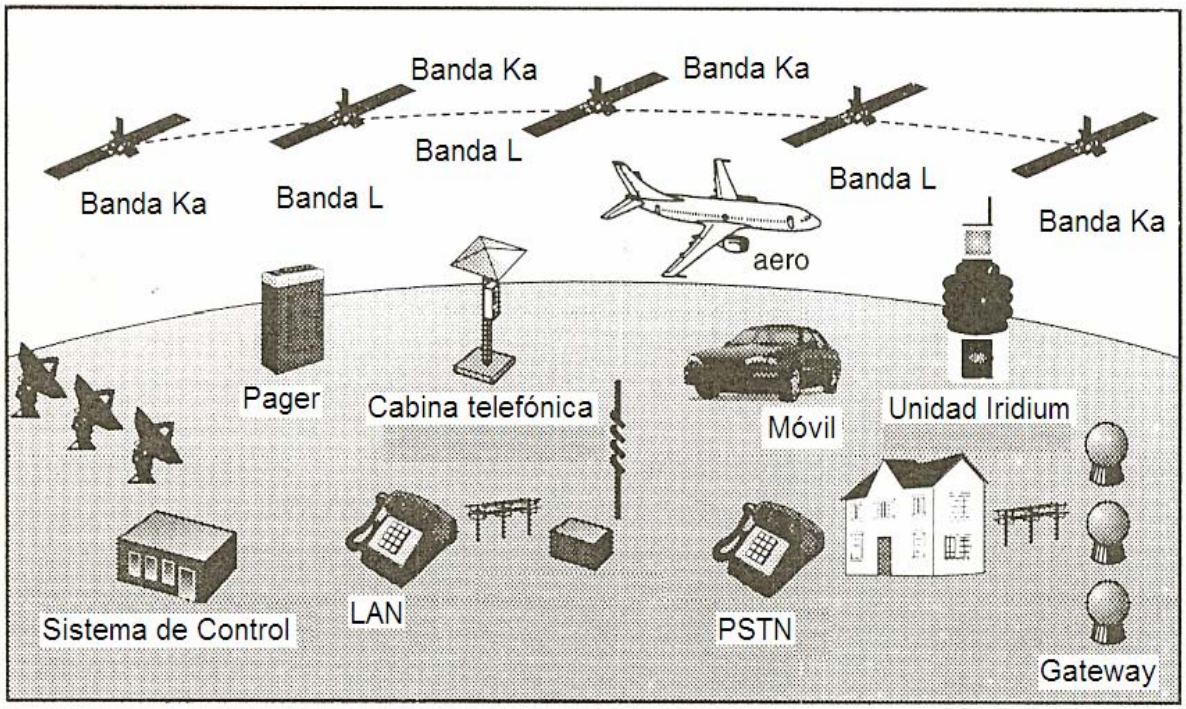


Figura 6.3 Arquitectura de Iridium

Iridium ha sido apoyada por un gran número de socios, los principales son:

- *Motorola Inc. Satellite Communication Division*, que fue el contratista principal, obtuvo un contrato por $ 3.4 billones de dólares con Iridium por el diseño, producción, lanzamiento de cohetes y organización del sistema de control del satélite. *Motorola* también obtuvo $2.8 billones por la operación y mantenimiento del sistema Iridium por 5 años, a partir de 1998.
- *McDonell Douglas Corp*. recibió un contrato por $ 400 millones de dólares por 8 lanzamientos en el Delta II, con 5 satélites en cada uno.
- *Raytheon Company* fue contratado para entregar los arreglos de antenas por $273 millones de dólares.
- *Lockheed Missiles & Space Co.* recibió $700 millones de dólares por la entrega de 125 estructuras satelitales.

6.2 Globalstar

El sistema satelital de órbita baja Globalstar representa un concepto relativamente sencillo para extender las redes celulares terrestres. Este sistema ha estado en operación desde noviembre de 1999. Dispositivos manuales que pueden ser utilizados en modo dual son los que dan soporte a servicios de voz, radiomensajes (*paging*) y datos.

Globalstar utiliza 48 satélites en 8 órbitas con un ángulo de inclinación de 52° a una altura de 1400 km, y provee cobertura global con excepción de las regiones polares, como se muestra de la figura 6.4. Esta constelación fue diseñada para proveer buena visibilidad en zonas de clima templado, dentro de las cuales tienen lugar negocios importantes.

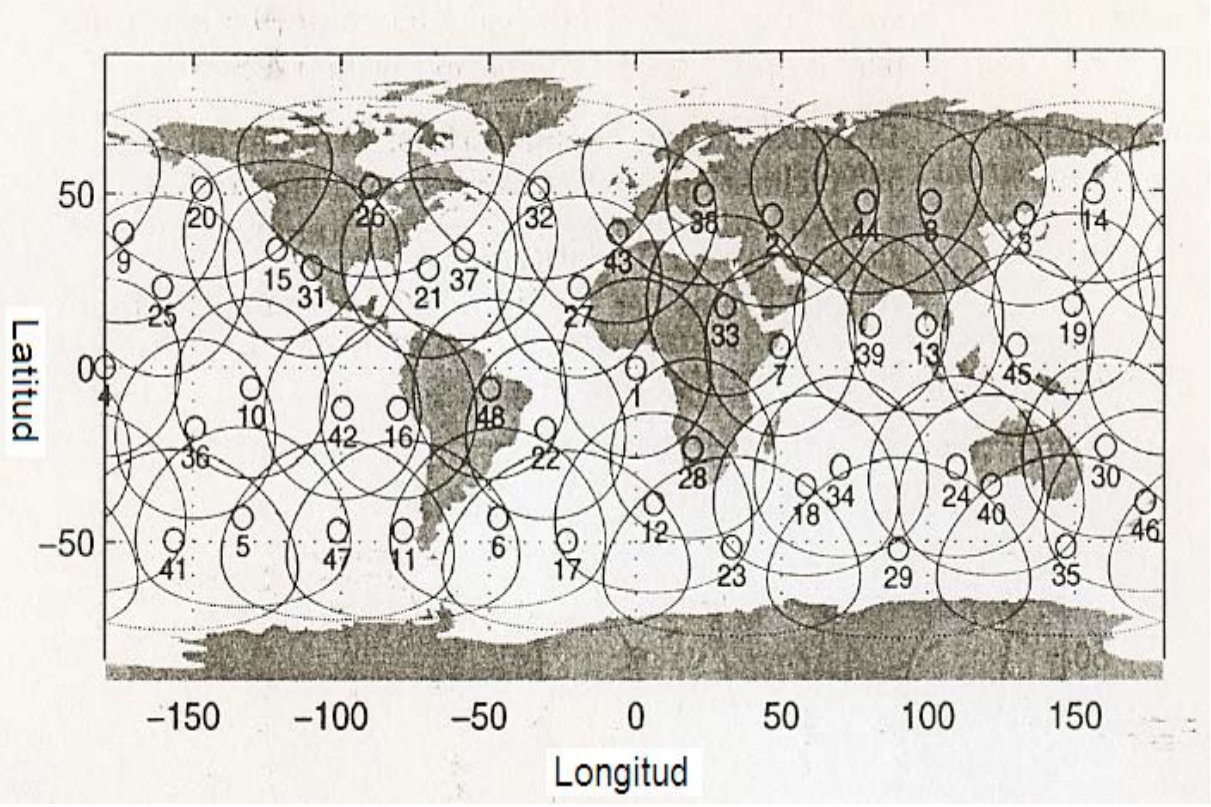


Figura 6.4 Cobertura del sistema Globalstar

Globalstar Ltd Partnership comprende las siguientes compañías:

- *Loral Space & Communications Ltd* es el socio mayoritario con el 42% de las acciones.
- *Space Systems/Loral* es el principal contratista para el segmento espacial, diseña los satélites y opera éstos y las estaciones terrenas.
- *Qualcomm Inc.* es responsable del segmento terrestre y de las terminales, desarrolla los *gateways* y es el proveedor de la tecnología CDMA que es usada en Globalstar.
- *Alcatel Space* desarrolla la carga útil de los satélites.
- *Alenia Spazio* lleva a cabo la integración y las pruebas de los satélites.
- *DASA* entrega los sistemas de bus, generadores solares, módulos de control de órbita y posición, y los módulos de propulsión.
- *Vodafone* actúa como el operador de la red.
- *Hyundai* entrega los subsistemas del satélite.
- *Airtouch, DACOM, Elsag Bailey y France Telecom* son socios financieros.

Globalstar provee los siguientes servicios:

- Telefonía móvil y fija a una velocidad adaptable de 2.4 / 4.8 / 9.6 kbps
- Fax
- Datos en tiempo real a una velocidad de 7.2 kbps, inclusive hasta 9.6 kbps.
- *Paging* (servicio de mensajes cortos) y servicio de mensajes de voz.
- Determinación de posición usando GPS integrado.

Los satélites de esta constelación tienen las siguientes características:

- Masa del satélite en órbita: 450 kg
- Masa de la carga útil: 152 kg
- Vida del satélite: 7.5 años
- Consumo de potencia DC: de 650 – 2260 W
- 16 transpondedores con canal de ancho de banda ajustable de 3 – 16.5 MHz
- Determinación de posición del satélite con GPS.

Globalstar puede utilizar las siguientes bandas de frecuencia:

- De la terminal al satélite: 1610 – 1626.5 MHz (banda L)
- Del satélite a la terminal: 2483.5 – 2500 MHz (banda S)
- Del *gateway* al satélite: 5091 – 5250 MHz (banda C)
- Del satélite al *gateway:* 6875 – 7055 MHz (banda C)

En la figura 6.5 se representan los 48 satélites que conforman la constelación Globalstar, en la cual cada satélite puede proveer 2500 canales de comunicación, dependiendo de la potencia de transmisión con reutilización de frecuencia en cada haz.

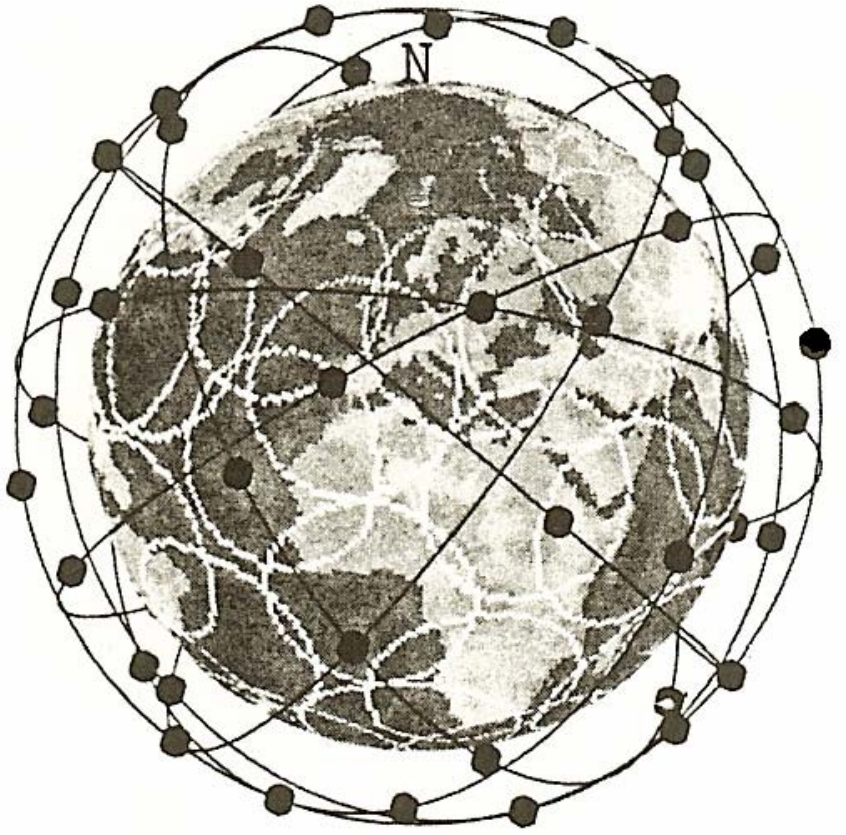


Figura 6.5 Sistema Satelital Globalstar

En la actualidad, Globalstar anunció el desarrollo de un sistema de comunicaciones para el manejo de emergencias, que consiste en una red satelital acoplada a un sistema celular en miniatura que permite a los personas que forman parte de una brigada de emergencia, comunicarse entre ellos o conectarse a la red pública de telefonía.

Los teléfonos satelitales Globalstar portátiles da a los brigadistas acceso a información crítica cuando las comunicaciones terrestres no están disponibles, como por ejemplo, durante y después de un desastre natural en localidades remotas.

El sistema de comunicaciones para el manejo de emergencias (*GEMCOMS*) consiste en múltiples teléfonos fijos Globalstar conectados a un switch celular en miniatura o picocel. Usando teléfonos celulares estándar, los brigadistas pueden llamar vía Globalstar a cualquier persona disponible en la red de telefonía pública. Además, pueden comunicarse unos a otros dentro de un radio aproximado de media milla. Teléfonos que no son inalámbricos pueden ser conectados al sistema *GEMCOMS* a través de un conector telefónico estándar (*jack*).

La unidad *GEMCOMS* es similar a la de un producto que Globalstar planea desarrollar cuando la FCC otorgue la autorización para el despliegue del Componente Terrestre Auxiliar (*ATC*), que en lugar de ir acoplado a un celular picocel, éste usaría solamente canales satelitales móviles de Globalstar, tanto en modo terrestre como en modo satelital.

A mediados del 2006, Globalstar espera tener en operación un nuevo *gateway* localizado en Wasilla, Alaska, que proveerá servicios de voz y datos satelitales, incluyendo correo electrónico, fax y acceso a internet. El servicio telefónico satelital provee un código de área 907, además de ofrecer rastreo, monitoreo y control de objetivos móviles, como son vehículos, embarques, etc.

Globalstar también ofrece servicios de emergencia 911 en todo Estados Unidos, Puerto Rico, Las Islas Vírgenes y Canadá, enviando todas las llamadas de emergencia de los suscriptores a un centro de llamadas para, posteriormente, ser referenciadas a una base de datos de un punto de respuesta de seguridad pública (*PSAP*), la cual es utilizada para determinar la ubicación del *PSAP* más cercano, utilizando un mapa *GPS* o por medio de la información que de la persona que está llamando, para convocar al personal de emergencia tan pronto como sea posible.

6.3 Teledesic

Teledesic se formó con el objetivo de crear medios para proveer acceso a una red avanzada de conexiones para todas aquellas partes del mundo que, probablemente, nunca lo tendrían con la tecnología existente en esas regiones. La información que día a día se genera alrededor del mundo cada vez es mayor, y va asociada directamente con la calidad de vida, como: oportunidades económicas, el cuidado de la salud y servicios públicos. Sin embargo, mucha gente en el mundo no tiene acceso ni siquiera a un servicio telefónico básico.

La revolución digital es muy importante y avanza a pasos agigantados. La fibra óptica es básicamente utilizada para conectar países y oficinas centrales de telefonía. Inclusive en un país como Estados Unidos, sólo una parte de esa fibra será extendida para acceso local o para oficinas u hogares, que representa el 80% del costo de la red. En la mayor parte del mundo el despliegue de fibra óptica nunca ocurrirá.

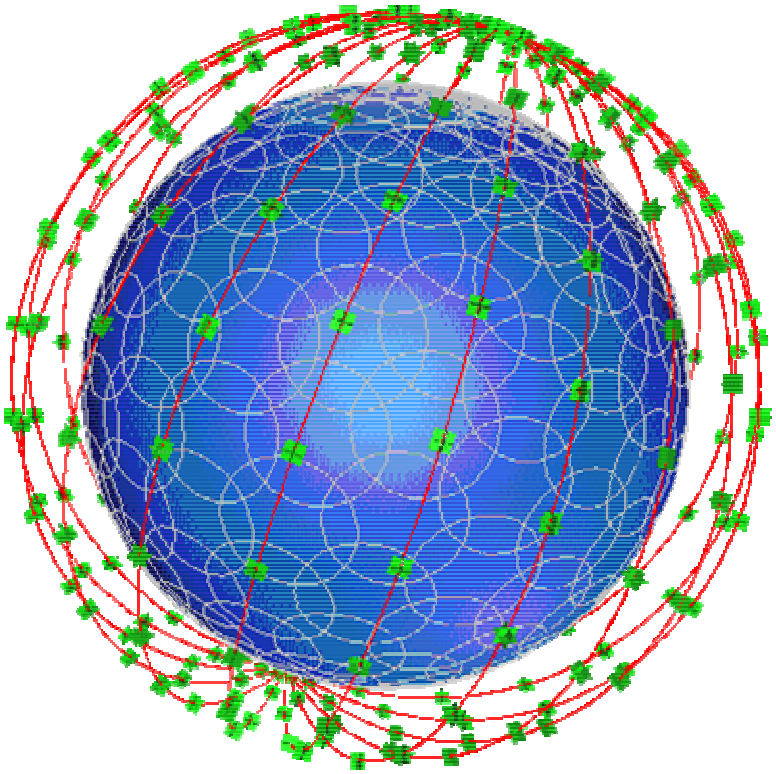


Figura 6.6 Sistema Teledesic

Teledesic se ha puesto como objetivo crear una red que permita a la gente tener acceso a información de una manera rápida y confiable. En la figura 6.6 se muestra como esta conformada la red Teledesic, que cuenta con el apoyo y soporte de Bill Gates, el fundador de Microsoft, la compañía líder en software y de Craig McCaw, fundador de una de las compañías más importantes en telefonía celular.

La solución que Teledesic ofrece es acceso inalámbrico de banda ancha por medio de un enlace satelital lo más parecido posible a las características que ofrece la fibra óptica, utilizando frecuencias dentro de la banda Ka, en el rango de 20 – 30 GHz.

Para mantener dichas características, además de canales de banda ancha, rango de error bajo y poco retraso en la señal, Teledesic decidió utilizar satélites de órbita baja, básicamente por el retraso en la señal, ya que los satélites geoestacionarios no pueden proveer el tipo de retraso que ofrece la fibra óptica.

Teledesic es el único sistema que emplea celdas fijas en la Tierra, en lugar de moverlas con la huella del satélite. Este tipo de configuración y el tamaño de las celdas ayudan a este sistema a ofrecer servicios en los límites nacionales.

El concepto original de este sistema comenzó en 1988, posteriormente en 1990 se formó una compañía conocida hoy como Teledesic Satellites. En 1997 le fue concedida la licencia por parte de la FCC para la construcción, lanzamiento y operación de la red Teledesic. Como contratista principal se escoge a la compañía Boeing, y para finales de 1998 se tiene el diseño de la red completamente terminado, y en el año 2000 comenzó la producción de los satélites.

En la figura 6.7 se muestra un satélite Teledesic, con los paneles solares completamente desplegados y orientados hacia el Sol de manera constante para obtener y almacenar la mayor cantidad de energía. Para el año 2001 comenzó la puesta en órbita de los satélites, para lo cual Teledesic firmó un contrato de lanzamiento con Lockheed Martin

para utilizar dos tipos de vehículos lanzadores: el Protón M y el Atlas V, y cada uno de ellos puede transportar múltiples satélites Teledesic.

Figura 6.7 Satélite Teledesic

Las características principales de Teledesic son:

- Servicios de datos, voz, fax y video
- Altitud 1375 km
- Utiliza 288 satélites en 12 órbitas con una inclinación de 98.16°
- Cada satélite pesa aproximadamente 700 kg
- La vida útil de los satélites esta estimada en 10 años
- Los tipos de acceso que utiliza con TDMA y FDMA
- Cada satélite emite 64 haces
- El diámetro de la huella del satélite es 1412 km
- Tanto en el enlace ascendente como en el descendente utiliza banda Ka

- Utiliza enlaces inter-satelitales (*ISL*) y procesamiento de información a bordo del satélite (*OBP*)

CONCLUSIONES

A lo largo de los capítulos presentados, se han expuesto las diferentes características y aplicaciones que tienen los distintos tipos de órbitas en las que pueden trabajar los satélites. De igual manera, se mencionaron sólo algunas de las constelaciones satelitales de órbita baja que se encuentran en servicio activo en la actualidad.

Desde sus inicios, los satélites han sido un gran apoyo para la humanidad en distintas áreas, por ejemplo, se dieron a conocer las primeras imágenes de la Tierra con propósitos meteorológicos, las primeras transmisiones televisivas a nivel mundial, las primeras fotografías que ayudaron a realizar mapas geográficos de nuestro planeta más detallados, las primeras imágenes de otras galaxias, localización de alguna persona o elemento en cualquier parte del mundo, etc.

Los satélites de órbita media (***MEO, Medium Earth Orbit***) y de órbita baja (***LEO, Low Earth Orbit***), que son referidos como satélites no geoestacionarios (***NGSO, Non-Geostationary Satellite Orbit***), ya son parte de la vida diaria de todos nosotros, simplemente desde el uso de teléfonos celulares, el Internet, un simple programa de televisión, video-conferencias, etc.

Cada uno de estos avances se ha logrado gracias a satélites más complejos que cuentan con mejores capacidades de comunicación. Dependiendo del tipo de misión que le es asignada a un satélite, es el tipo de órbita en la que será colocado. Algunos satélites tienen que mantenerse muy cerca de nuestro planeta, otros en órbitas elípticas muy altas, otros en órbitas geoestacionarias y otros en órbitas polares.

El objetivo del presente trabajo de tesis ha sido simplemente exponer los sistemas de satélites de órbita baja como otra de las muchas opciones que existen para la transmisión de información a nivel mundial, y a continuación se presenta una tabla comparativa entre los satélites de órbita geoestacionaria y los satélites de órbita baja para resumir un poco las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

GEOESTACIONARIOS

- Tienen cobertura continua.
- No tienen cobertura en los polos.
- El sistema requiere de pocos satélites.
- El satélite permanece estacionario en relación con un punto fijo en la Tierra, por lo tanto antenas fijas de alta ganancia pueden ser utilizadas.
- El ángulo de elevación puede ser pequeño, lo que incrementa la pérdida de señal y requiere de gran potencia.
- El tiempo de retardo de la señal es alto, aproximadamente 0.5 s.
- Se requiere de una gran cantidad de energía utilizada para alcanzar la órbita geoestacionaria.
- El número de satélites de respaldo es muy pequeño.
- La generación de potencia del satélite es más eficiente cuando las temporadas de eclipses son cortas.
- Sólo se requiere de una estación terrena para el control y monitoreo del satélite.

ORBITA BAJA

- Podría tenerse cobertura global continua.
- El sistema requiere de un gran número de satélites.
- El satélite se mueve en relación a un punto fijo en la Tierra, por lo tanto el usuario requiere tener antenas de haz ancho o delgado.
- El ángulo de elevación es alto, por lo que es ideal para servicios satelitales móviles sin una antena fija
- La pérdida de la señal es baja
- La potencia del satélite puede ser baja
- El tiempo de retardo en la señal es mucho menor.
- No se requiere tanta energía para poner el satélite en órbita
- Mayor número de satélites de respaldo.
- Requiere de varias estaciones terrenas para coordinar los satélites y su tráfico.

Ha sido un camino largo el que se ha recorrido, y gracias a las investigaciones que han realizado distintos personajes a lo largo de la historia es que ahora se cuenta con la presente tecnología, la cual deberá ser utilizada para los mejores propósitos posibles.

El diseño del sistema satelital dependerá completamente de las necesidades que se requieran cubrir, y desde luego del presupuesto con el que se cuente. La decisión de colocar un satélite en órbita requiere de un estudio laborioso y minucioso, basándose en diferentes parámetros, como: el objetivo de la misión, la cobertura que tendrá, a qué tipo de usuarios se prestará el servicio, los tipos de servicios que serán proporcionados, etc.

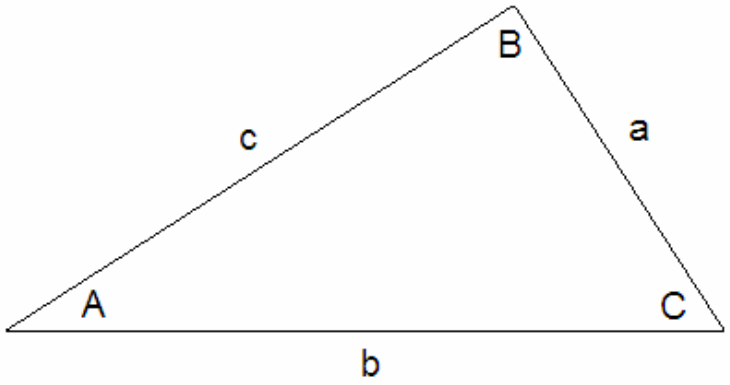
Por lo tanto, una inversión considerable es requerida, ya que también es necesario realizar contratos con diferentes proveedores y lograr poner en servicio un satélite o una constelación de satélites.

Ya sea geoestacionario, de órbita baja, órbita elíptica u órbita polar, el objetivo es que el satélite cumpla con las funciones y los requerimientos, establecidos desde el comienzo del proyecto, para los cuales fue diseñado y construido y, por supuesto, que cumpla con la vida útil esperada y tenga el menor número de fallas posibles.

Utilizando toda la tecnología descrita, y los descubrimientos que en un futuro próximo aparezcan, los satélites deben utilizarse para el beneficio de la humanidad, para continuar el avance en las telecomunicaciones a nivel mundial y para reducir las fronteras y distancias.

APÉNDICE A

1. Fórmulas trigonométricas



Ley de senos: $\frac{\text{sen A}}{a} = \frac{\text{sen B}}{b} = \frac{\text{sen C}}{c}$

Ley de cosenos: $a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A$

2. Demostración de la suma de los ángulos internos de un triángulo

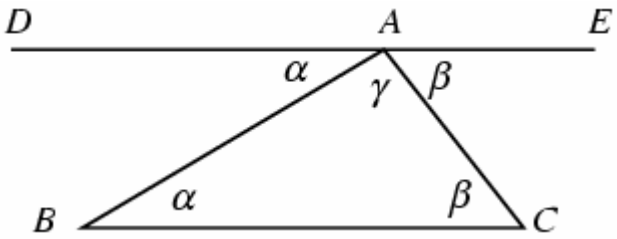


Figura A.2

La suma de los ángulos internos de un triángulo es igual a 180°, lo cual puede demostrarse de la siguiente manera: se traza una línea DAE paralela a la línea BC, como lo muestra la figura A.2, entonces los ángulos α y β satisfacen las siguientes expresiones: α = ∠DAB = ∠ABC y β = ∠EAC = ACB. Agregando el ángulo γ, puede escribirse: **$\alpha + \beta + \gamma = 180°$**, como la suma de los ángulos del segmento lineal DAE debe ser igual a 180°, puede afirmarse que la suma de los ángulos internos de un triángulo es igual a 180°.

APÉNDICE B

1. El decibel (dB)

El decibel es una relación de potencia que se emplea la comparar el nivel de la misma entre dos diferentes señales. Un decibel es igual a 10 veces el logaritmo base 10 de la relación de potencia:

$$dB = 10 \log_{10} P_2 / P_1$$

Si $P_2 = P_1$ no hay cambio en el nivel de potencia y dB = 0. Si $P_2 > P_1$ hay un incremento en el nivel de potencia y el nivel de decibeles es positivo. Si $P_2 < P_1$ hay un decremento en el nivel de potencia y el nivel de decibeles es negativo. Si se tienen valores de voltaje o corriente los decibeles se obtienen así:

$$dB = 20 \log_{10} v_1 / v_2$$
$$dB = 20 \log_{10} a_1 / a_2$$

2. Propiedades de los logaritmos

a) El logaritmo de uno es igual a cero:

$$\log_{10} 1 = 0$$

b) El logaritmo de cualquier número menor que uno es un número negativo:

$$\log_{10} 0.5 = -0.3$$

c) El logaritmo del producto de dos números es la suma de los logaritmos de los números:

$$\log_{10} ab = \log_{10} a + \log_{10} b$$

d) El logaritmo del cociente de dos números es el logaritmo del numerador menos el logaritmo del denominador:

$$\log_{10} (a / b) = \log_{10} a - \log_{10} b$$

e) El logaritmo de un número elevado a una potencia es igual al producto de la potencia y el logaritmo del número:

$$\log_{10} a^n = n \log_{10} a$$

APÉNDICE C

1. Diferentes relaciones de los decibeles (dB)

RELACION	DESCRIPCION
dBi	*decibles relativos a un radiador isotrópico*
dBk	*decibles relativos a grados Kelvin*
dBm	*decibles relativos a 1 mW*
dBm0	*decibles relativos a 1 mW que también es la referencia cero*
dBv	*decibles relativos a 1 volt*
dBW	*decibles relativos a 1 W*
dBpW	*decibles relativos a 1 picaWatt*
dBμW	*decibles relativos a 1 microWatt*
dBμV	*decibles relativos a 1 microVolt*

BIBLIOGRAFÍA

- Sheriff, Ray E. y Fun Hu Y., ***Mobile Satellite Communication Networks***, John Wiley & Sons, 2001

- Martin, James, ***Communications Satellite Systems***, Prentice-Hall, 1978

- Evans, B.G., ***Satellite Communication Systems***, Peter Peregrinus Ltd, 1987

- Dalgleish, D.I., ***An Introduction to Satellite Communications***, Peter Peregrinus Ltd, 1989

- Kalawole, Michael O., ***Satellite Communication Engineering***, Marcel Dekker, Inc, 2002

- Lutz, E., Werner, M., Jahn, A., ***Satellite Systems for Personal and Broadband Communications***, SpringerVerlag Berlin Heidelberg, 2000

- Lewis, Geoff, ***Communications Systems Engineer's Choices***, 3ª edición, Butterwoth-Heinemann, 3ª edición 1999

- Miller, J. Michael, Vucetie, Branka, y Beny, Les, ***Satellite Communiations Mobile and Fixed Services***, Kluwer Academic Publishers, 1998

- Pratt, Timothy, Bostian, Charles W., ***Satellite Communications***, John Wiley & Sons, 2ª edición, 2003

- Agrawal, Brij N., ***Design of Geosynchronous Spacecraft***, Prentice-Hall, 1986

- Maral, G., Bousquet M., ***Satellite Communication Systems***, 3ª edición, 1998

- Lewis, Geoff, ***Basic Communication Concepts***, Butterworth-Heinemann, 1999

- Morgan, Walter L. & Gordon, Gary D., ***Communications Satellite Handbook***, John Willey & Sons, 1989

- Spilker, Jr., ***Digital Communications by Satellite***, Prentice-Hall, 1977