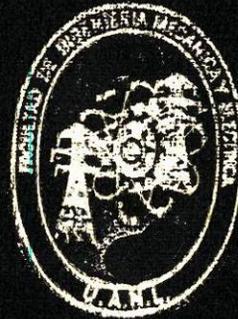
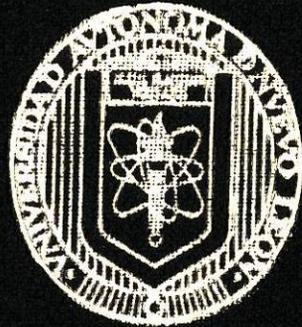


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACTULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA



COMUNICACION VIA SATELITE

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
ING. EN ELECTRONICA Y COMUNICACIONES

PRESENTA

FRANCISCO JAVIER CASTILLEJA VALADEZ
ASESOR: ING. FERNANDO ESTRADA SALAZAR

CD. UNIVERSITARIA

ABRIL DE 1997

T

TK510

C3

C.1



1080072247

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACTULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA



COMUNICACION VIA SATELITE

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
ING. EN ELECTRONICA Y COMUNICACIONES

PRESENTA

FRANCISCO JAVIER CASTILLEJA VALADEZ

ASESOR: ING. FERNANDO ESTRADA SALAZAR

CD. UNIVERSITARIA

ABRIL DE 1997

+
TK5104
C3



Agradezco de todo corazón a mis padres José Carlos Castilleja Zapata y María Leonor Valadez Salazar, así como también a todos mis hermanos por haberme brindado todo su apoyo y confianza durante mi carrera profesional. De la misma manera a mis padrinos que en paz descansen.

CONTENIDO.

	Pag.
INTRODUCCION.....	1
DEFINICION, CARACTERISTICAS Y CLASIFICACION DE LOS SATELITES.....	2
LANZAMIENTO Y COLOCACION DEL SATELITE EN LA ORBITA GEOESTACIONARIA.....	6
FACTORES QUE AFECTAN AL SATELITE EN EL ESPACIO.....	17
PRINCIPALES SUBSISTEMAS DE UN SATELITE.....	21
DESCRIPCION DEL CIRCUITO HIPOTETICO DE REFERENCIA.....	39
ACCESO MULTIPLE.....	43
FRECUENCIAS ASIGNADAS Y REUTILIZACION DE FRECUENCIAS.....	48

INTRODUCCION

Los satélites integran una gran familia y parte de ella la constituyen los que están abocados específicamente a los servicios de comunicaciones; dentro de estos últimos, existen algunas variantes, pero los GEOESTACIONARIOS son los más importantes y los que más se utilizan en la actualidad. Con ellos es posible ahora comunicar lugares muy lejanos o que previamente eran inaccesibles, y la cantidad y variedad de la información que transmiten y reciben es sorprendente.

Por ejemplo, se pueden ver en vivo programas de televisión que se están transmitiendo en otra ciudad o país, hablar por teléfono a cualquier parte del mundo, transmitir cursos de actualización y de entrenamiento a zonas urbanas y rurales, efectuar diagnósticos médicos a cientos o miles de kilómetros de distancia, realizar transacciones bancarias, actualizar o consultar bancos de datos de computadoras, intercambiar información por medio del INTERNET con otros países del mundo. Gracias a ellos se puede conocer con precisión fenómenos metereológicos, se han acortado las distancias entre las ciudades y los países, pudiendo intercambiar información casi instantáneamente.

DEFINICION, CARACTERISTICAS Y CLASIFICACION DE LOS SATELITES.

DEFINICION.

Un satélite es básicamente una repetidora (en el rango de las microondas) en el espacio, es un sistema muy complejo y delicado, integrado por varios subsistemas, los cuales son de gran importancia, debido a que una falla en algunos de ellos podría causar la inutilidad parcial o total del conjunto.

Un satélite no crea transmisiones por sí mismo, solo retransmite lo que le transmite la Tierra, recibe la señal de la Tierra en la banda llamada UP-LINK y la regresa en la banda DOWN-LINK produciendo un retardo de aproximadamente 0.26 segundos.

La necesidad de la comunicación vía satélite, surge debido a que las radiocomunicaciones por onda corta (banda HF) sólo pueden proporcionar un número limitado de canales debido a la estrechez del ancho de banda utilizable. Debemos recordar, que a mayor frecuencia portadora se dispone de un ancho de banda y por lo tanto, de mayor capacidad; en la actualidad la banda ya está saturada. Además la propagación de esta banda está afectada por factores aleatorios ya que depende de la ionósfera, la cual es esencialmente irregular y cambiante introduciendo en consecuencia un importante porcentaje de incertidumbre.

En lo que respecta a los enlaces de redes microondas por Tierra, los problemas de ancho de banda (capacidad) y de la incertidumbre por la ionósfera son ampliamente superados constituyendo un medio de gran confiabilidad y capaz de manejar una gran capacidad de información (tanto en telefonía como en TV). Sin embargo, no es factible su empleo en enlaces intercontinentales por la imposibilidad de instalar repetidoras con las características que ellas exigen, en medio de los océanos (no olvidemos que las microondas solo se propagan a línea de vista, es decir, en línea recta). Fuera de esta dificultad, económicamente son convenientes.

En lo que respecta a los cables (sobre todo los submarinos) tienen un ancho de banda, que aunque es amplio, es limitado y su costo aumenta con la extensión. La utilización del satélite hace factible el uso de las microondas con las ventajas inherentes a las mismas en cuanto a capacidad, agregándose a esto la ventaja que significa el poder

utilizar una sola repetidora para enlazar dos puntos situados a distancias considerablemente grandes en vez de una red de 30 ó más repetidoras. Por otra parte, el satélite permite el salto de los océanos para lograr la comunicación intercontinental de alta capacidad.

VENTAJAS DE LA COMUNICACION VIA SATELITE.

A) SIMPLIFICACION DEL SISTEMA.

Debido a su gran altura (aproximadamente 36,000 km) se tiene línea de vista entre el satélite y cualquier estación terrena que este dentro de su área de cobertura la cual puede llegar a ser tal, que se cubren prácticamente el 40% de la superficie de la Tierra con un solo satélite. Esto simplifica enormemente el sistema ya que el satélite sustituye a las redes de microondas con las consiguientes ventajas tanto técnicas como económicas.

B) MAYOR CALIDAD.

Debido a cualquier proceso electrónico degrada la señal al agregar algo de ruido (aunque sea mínimo), debemos considerar la gran ventaja de manejar un enlace a través de una sola repetidora (el satélite), y por lo tanto, una sola fuente de ruido; comparando contra un enlace utilizando una red de microondas de 20 ó más repetidoras, por lo tanto 20 ó más fuentes de ruido. Definitivamente la calidad de la señal en un enlace vía satélite es mucho más alta que un enlace a través de una red de microondas.

C) MAYOR CONFIABILIDAD.

Otra consecuencia del hecho de utilizar una sola repetidora, en vez de una red de ellas en los enlaces vía satélite es la reducción de la posibilidad de fallas a una sola. (el satélite), lo cual da una gran confiabilidad en el sistema. Además hay que considerar las normas más estrictas que controlan la fabricación del satélite, lo que permite la seguridad de su funcionamiento durante su tiempo de vida útil. El hecho de que los fabricantes de los satélites proveen a este equipo redundante para las partes más susceptibles de daño lo que definitivamente garantiza su funcionamiento.

D) ALTA CAPACIDAD.

Aquí podríamos hacer énfasis en la ventaja de utilizar las microondas como frecuencias portadoras, lo que permite disponer de un ancho de banda amplio y por lo tanto, el tener una gran capacidad de manejo de información. De hecho, los satélites actuales tienen la capacidad para manejar hasta 24 canales de TV simultáneamente o su equivalente en telefonía (aproximadamente 960 canales telefónicos por cada canal de TV) por cada banda que disponga (C y/o Ku).

E) VENTAJAS DE TIPO SOCIAL.

Por medio de los satélites se tiene acceso a lugares que por medio de otros sistemas de comunicación no se podría, este es el caso de regiones pantanosas, bosques, islas, etc.

CLASIFICACION DE LOS SATELITES.

1.- DE ACUERDO A SU PRINCIPIO DE OPERACION:

a) PASIVOS.- actúa solamente como superficie reflectora, fueron los primeros satélites que se usaron, eran esféricos y recubiertos de un material metálico para reflejar las señales que se transmitían desde la Tierra. Era necesario transmitir con una muy alta potencia.

b) ACTIVOS.- involucran un proceso electrónico en el satélite (grabación, reproducción, amplificación, cambio de frecuencia, etc.), los satélites reciben señales de microondas por su antena receptora, amplifica éstas señales, cambia la frecuencia de frecuencia de subida a frecuencia de bajada, amplifica nuevamente y retransmite las señales de microondas hacia la Tierra.

2.- DE ACUERDO A SU APLICACION:

a) CIVILES.- son los más conocidos y dentro de estos podemos incluir a los de comunicaciones, meteorológicos y de investigación.

b) MILITARES.- son los satélites llamados bélicos y son usados para vigilancia.

3.- DE ACUERDO A SU ORBITA:

a) **GEOESTACIONARIOS.-** son aquellos que permanecen fijos con respecto a la Tierra, es decir, visto desde la Tierra aparecer como un punto fijo en el cielo. Se puede disponer de ellos las 24 horas del día, además de que son los más usados para comunicaciones.

Este tipo de satélites al permanecer fijos con respecto a la Tierra, no es necesario rastrear el movimiento para orientar la Tierra. Una vez orientada la antena se dispondr del satélite todo el tiempo, condición necesaria para en un buen sistema de comunicaciones.

b) **NO GEOESTACIONARIOS.-** este tipo de satélite aparecería siempre en movimiento con respecto a la Tierra, un ejemplo de esto es la Luna.

4.- DE ACUERDO A SU COBERTURA:

a) **GLOBALES.-** un sistema ser global cuando su transmisión cubra todo el espacio sobre la Tierra, de acuerdo a la línea de vista desde el satélite. En la práctica un 40% de la superficie de la Tierra es "vista" desde un satélite geoestacionario. Estos satélites sirven para comunicaciones internacionales, y se necesitan por lo menos tres para cubrir toda la superficie de la Tierra, entre los cuales están los del sistema INTELSAT, que pertenecen a la ONU.

b) **DOMESTICOS.-** este tipo de satélite es aquel que su transmisión cubra solo una rea específica que puede ser grande o pequeña según sean los requerimientos (por ejemplo un país). La ventaja de este tipo de satélites es que concentran su potencia a una pequeña parte de la superficie de la Tierra de modo que las señales son más intensas en el área a servir. Aquí debemos incluir un tipo de satélite con cobertura intermedia entre el global y el doméstico, es decir, los "regionales" cuyo objetivo es cubrir varias zonas específicas, por ejemplo varios países o alguna región de ellos pero sin intentar cubrir toda el área que cubre un global, por ejemplo el Solidaridad I y II de México.

Técnicamente la diferencia entre un satélite y otro es solamente la antena que es la que define el tipo de cobertura. En el caso de un satélite de cobertura global la antena utilizada comúnmente es del tipo de corneta, mientras que los de cobertura doméstica, como el MORELOS, la antena es de tipo parábola. Los sistemas globales son para comunicaciones internacionales e intercontinentales, mientras que los domésticos son para comunicaciones locales.

LANZAMIENTO Y COLOCACION DEL SATELITE EN LA ORBITA GEOESTACIONARIA.

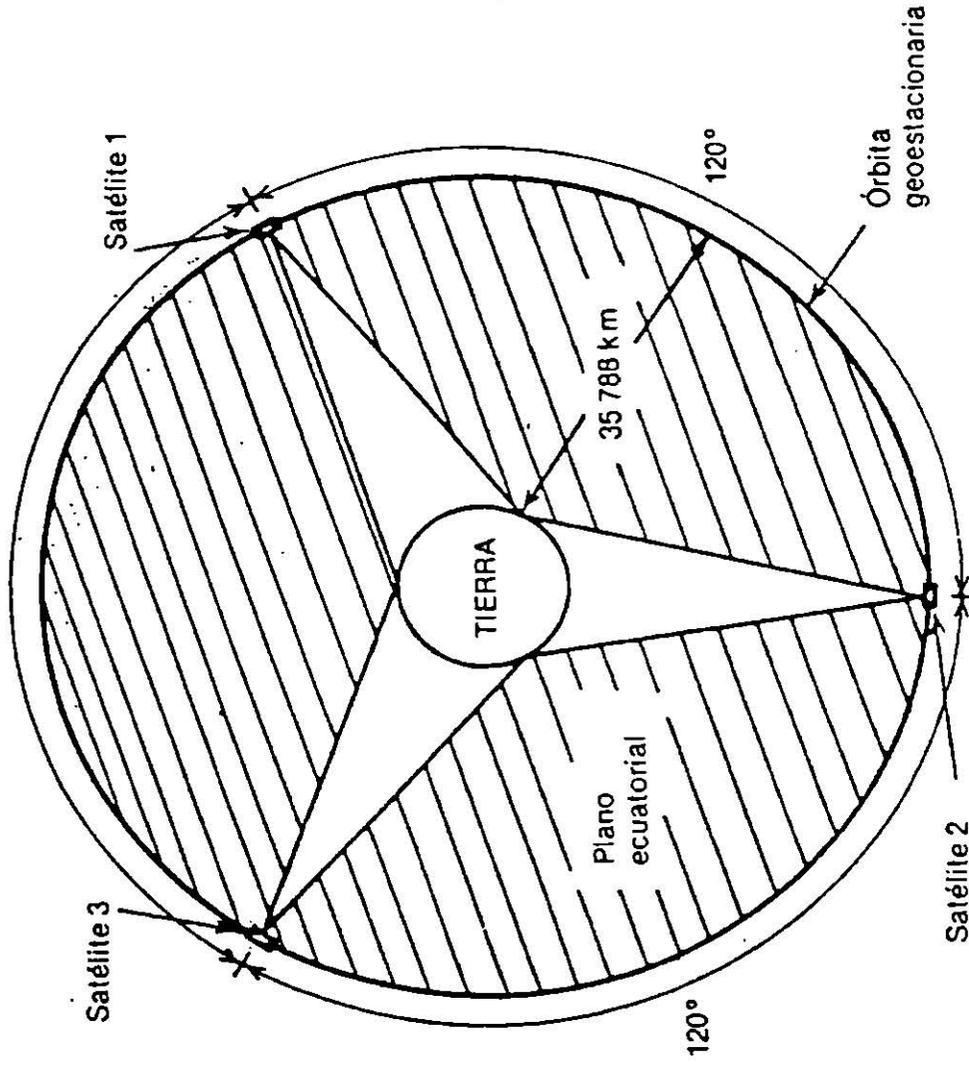
EL CINTURON DE CLARKE.

En 1945, Arthur C. Clarke sugirió en una de sus publicaciones la posibilidad de colocar satélites artificiales en una órbita tal que al observarlos desde un punto sobre la superficie de la Tierra parecería que no se moviesen, como si estuviesen colgados en el cielo. Los satélites no cambiarían aparentemente su posición y esto traería consigo grandes ventajas, pues tal como se verificaría años más tarde, su operación se simplificaría y el costo de los equipos terrestres necesarios para utilizarlos se reduciría, en relación con el uso de otras órbitas.

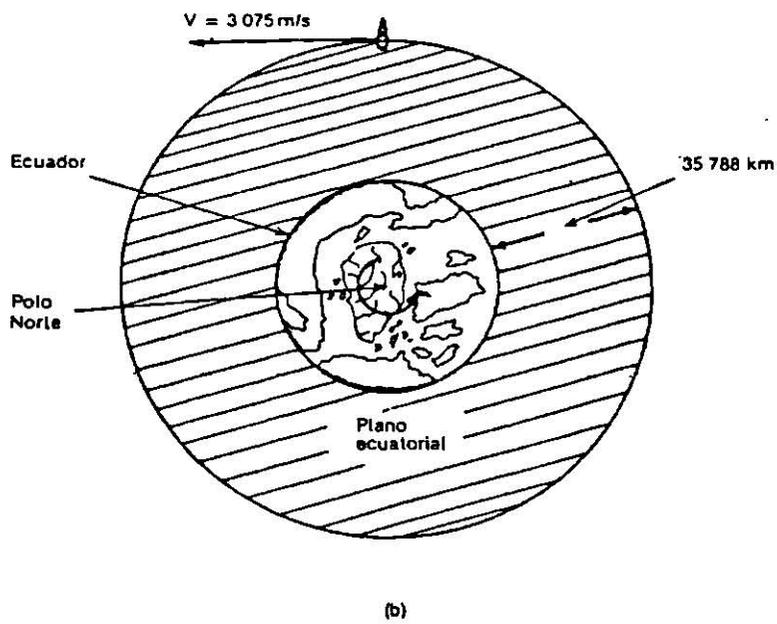
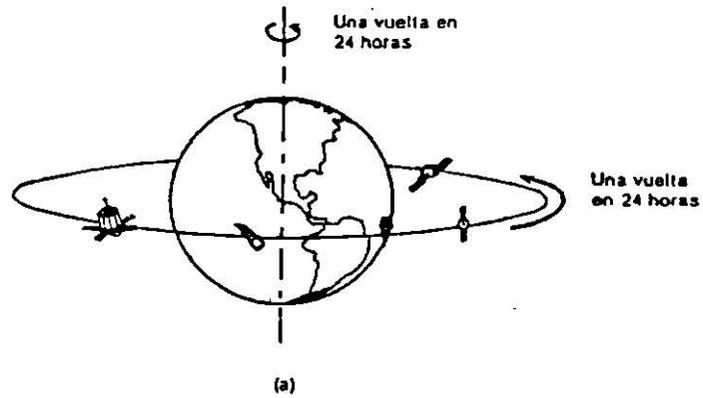
La idea de Clarke era muy buena y debían cumplirse varios requisitos para que el satélite fuera en verdad fijo con respecto a la Tierra, es decir, GOESTACIONARIO. En primer lugar, el satélite debía desplazarse en el mismo sentido de la rotación de la Tierra; además, para que no perdiese altura poco a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

Llegó el día en que la era espacial se inició, en 1957, con el lanzamiento del Sputnik 1, y después de varias pruebas con algunos otros satélites en esos primeros años, al fin se colocó en órbita el primer satélite geoestacionario del mundo, llamado SYNCOM. Poco más tarde, había un satélite Intelsat III sobre cada uno de los océanos principales (Atlántico, Pacífico e Indico), intercomunicando al mundo; era el año de 1968 y los sueños de Clarke se habían convertido en una realidad, 23 años después de haber publicado sus ideas.

La órbita en cuestión recibe el nombre de ORBITA GEOESTACIONARIA, pero con mucha frecuencia muchos autores e investigadores también se refieren a ella como el Cinturón de Clarke, en justo reconocimiento a su promotor. En la actualidad, ésta es la órbita más congestionada alrededor de la Tierra; muchos propietarios de satélites, si no todos, quieren estar ahí por obvias razones de sencillez y bajo costo de operación. En ella se encuentran satélites de apariencia física y aplicaciones muy diversas; meteorológicas, militares, experimentales y de comunicaciones.



Clarke indicó que con solamente tres satélites en órbita geostacionaria sería posible intercomunicar por radio a casi la totalidad del mundo habitado, desde luego con una limitación en la cantidad de tráfico simultáneo.



Los satélites geoestacionarios giran alrededor de la Tierra sobre el plano ecuatorial, completando una vuelta en 24 horas. Para un observador sobre un punto fijo de la Tierra, los satélites no se mueven. a) Vista lateral; b) vista superior.

COMO LLEGAR A LA ORBITA GEOESTACIONARIA.

Gracias a las leyes de Isaac Newton que rigen la mecánica clásica, se sabe que la fuerza de atracción entre un cuerpo y la Tierra es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que hay entre ambos y directamente proporcional al producto de sus masas; asimismo, que si un cuerpo se le aplica una acción entonces este responde con una reacción igual y de sentido contrario, oponiéndose a la acción original. En teoría, el número de tipos de órbita en los que un satélite se puede colocar alrededor de la Tierra es infinito, pero como ya se indicó anteriormente, la más codiciada y utilizada de las órbitas posibles es la geostacionaria.

Existen tres procedimientos distintos para llevar al satélite a esa órbita, los cuales se describen a continuación:

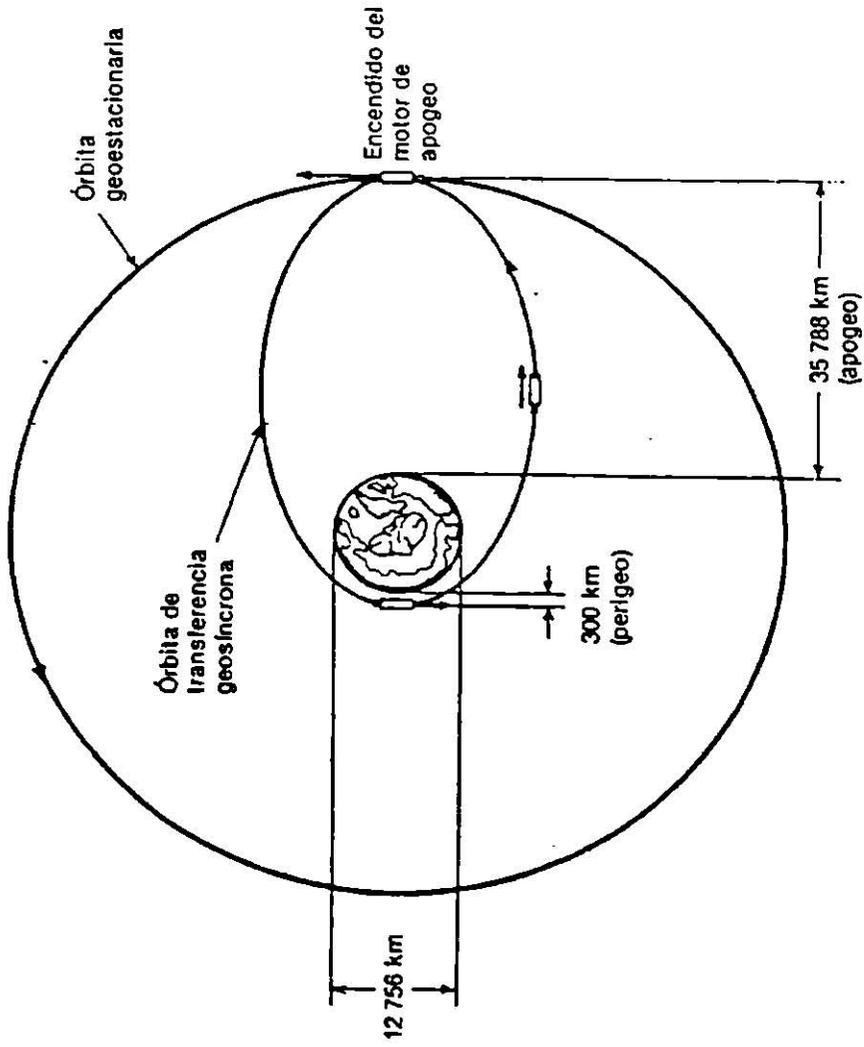
Inyección directa en órbita geostacionaria.

El satélite es transportado por un cohete de varias etapas hasta el cinturón de Clarke, sin que necesite realizar esfuerzos propios, lo que en cambio si es necesario en los otros procedimientos que se explican más adelante. Este procedimiento es muy costoso y solo se utiliza para lanzar satélites militares; como el satélite no realiza esfuerzos propios, es decir, no lleva motores acoplados directamente a él, para pasar de una órbita a otra, la probabilidad de que llegue a su destino en buenas condiciones aumenta.

Inyección inicial en órbita elíptica.

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

El perigeo de la órbita de transferencia geosíncrona está aproximadamente a una altura aproximada de 200 km sobre el nivel del mar y su apogeo cerca de los 35,788 km, que es la altura final en la que el satélite debe de quedar para funcionar. El paso siguiente es circularizar la órbita y para ello el satélite lleva acoplado un motor que se enciende precisamente en el punto de apogeo de la última vuelta elíptica que se ha programado; obviamente, el encendido se efectúa después de haber orientado al satélite a control remoto en forma adecuada, para que el empuje del motor de apogeo resulte en la dirección correcta.



Algunos cohetes, como los Ariane de la Agencia Espacial Europea, colocan a los satélites geostacionarios en dos pasos. El satélite se pone primero en una órbita elíptica de transferencia geosíncrona y después de varias vueltas, en uno de los apogeos se enciende un motor que circulariza la órbita, quedando así el satélite en órbita geostacionaria.

Al encenderse éste, el satélite recibe un incremento sustancial de velocidad y su órbita cambia, pasando de la elíptica de transferencia geosíncrona a la circular geostacionaria, (ver figura anterior).

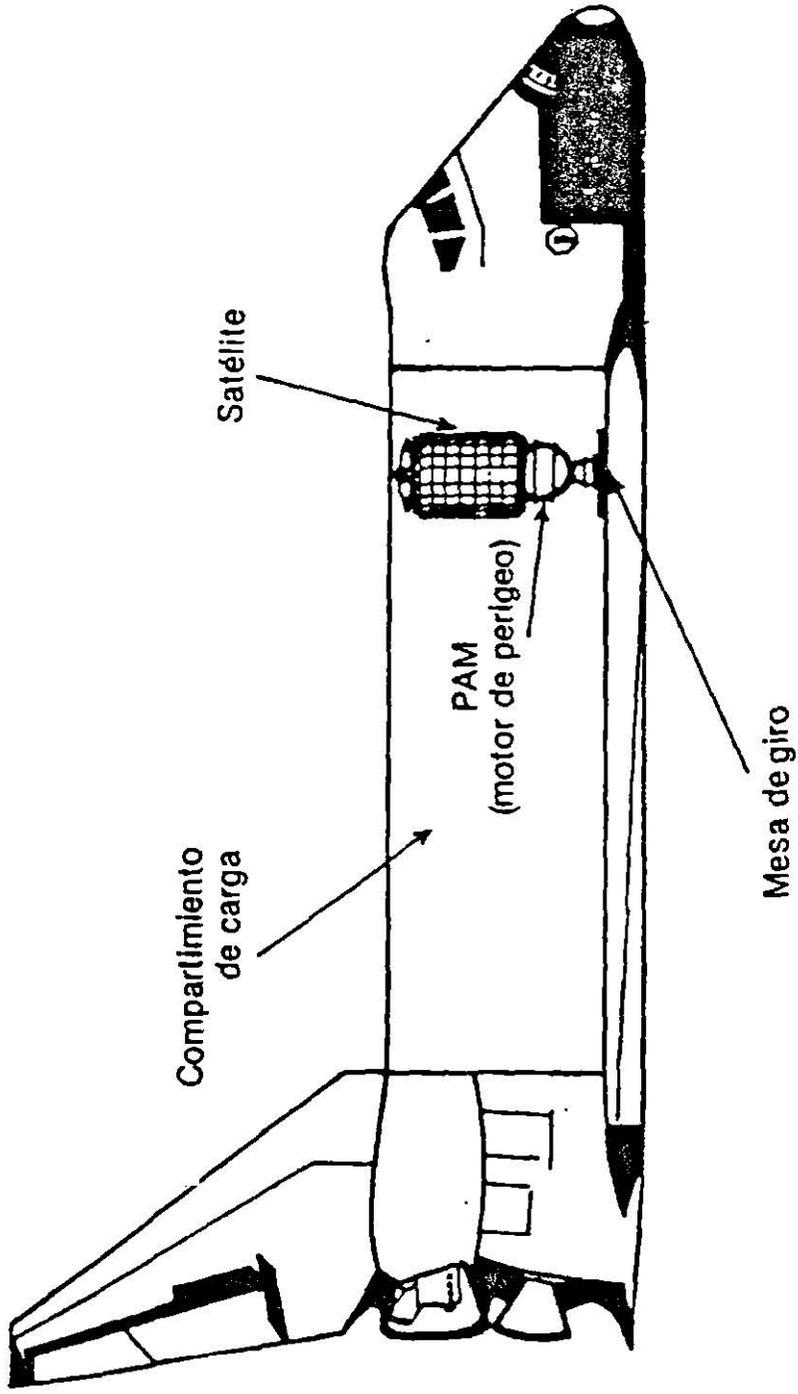
Inyección inicial en órbita circular.

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

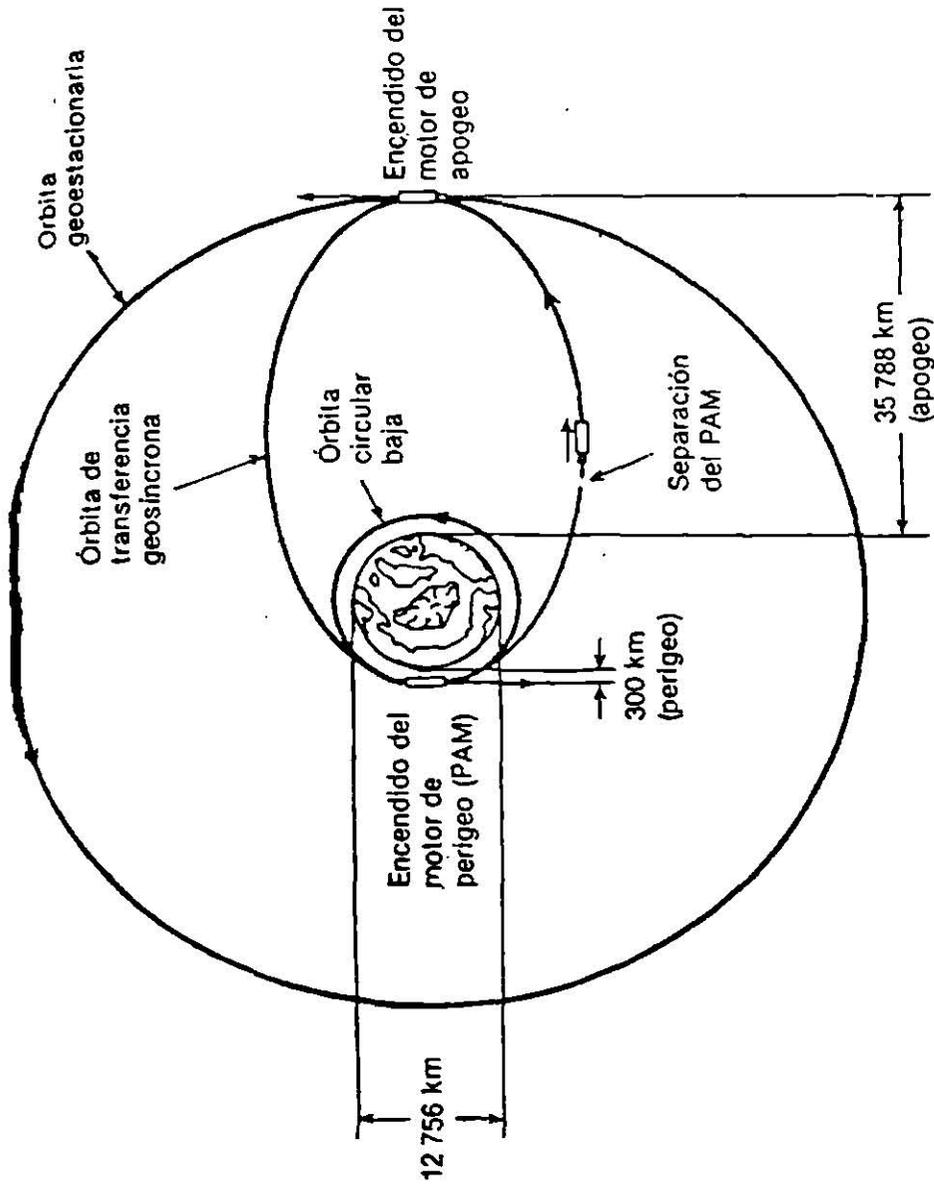
El orbitador despega llevando al satélite en su compartimiento de carga y entra en órbita alrededor de la Tierra siguiendo una trayectoria circular, a una altura aproximada de 300 km sobre el nivel del mar. En una de las muchas vueltas que da la nave, el satélite es liberado o arrojado del compartimiento de carga, quedando también de esta forma en órbita circular baja alrededor de la Tierra, aunque separado del vehículo espacial; la velocidad inicial del satélite es la misma que la de la nave, aunque ligeramente modificada

por el efecto de los resortes que se emplean para arrojarlo del compartimiento de carga. La separación se efectúa cuando la nave va cruzando el plano del ecuador, y 45 minutos más tarde, cuando el satélite vuelva a cruzar el plano del ecuador, su motor de perigeo se enciende. Este le da el empuje tal que modifica su órbita, cambiándola de circular baja o de estacionamiento a una elíptica, similar a la del segundo caso explicado anteriormente. Una vez que sea cumplido su función el motor de perigeo se desprende del resto del cuerpo del satélite, dando así las condiciones adecuadas para que, más adelante y en el momento preciso un motor de apogeo acoplado al cuerpo del satélite se encienda para circularizar la órbita con su altura final.

En realidad el procedimiento para colocar un satélite en órbita geostacionaria no es tan simple como parece ser de acuerdo con los tres métodos descritos. No solamente hay que proporcionarles cambios o incrementos de velocidad al satélite para modificar la geometría de las órbitas que forman parte del procedimiento elegido, sino que al mismo tiempo también hay que lograr pasar de un plano a otro, y todo ello haciendo el menor consumo posible de energía (combustible) para reducir los costos de lanzamiento.



Configuración de un satélite almacenado en el compartimiento de carga de un orbitador. Un satélite de mayores dimensiones iría en posición horizontal (véase también la Fig. 1.10).



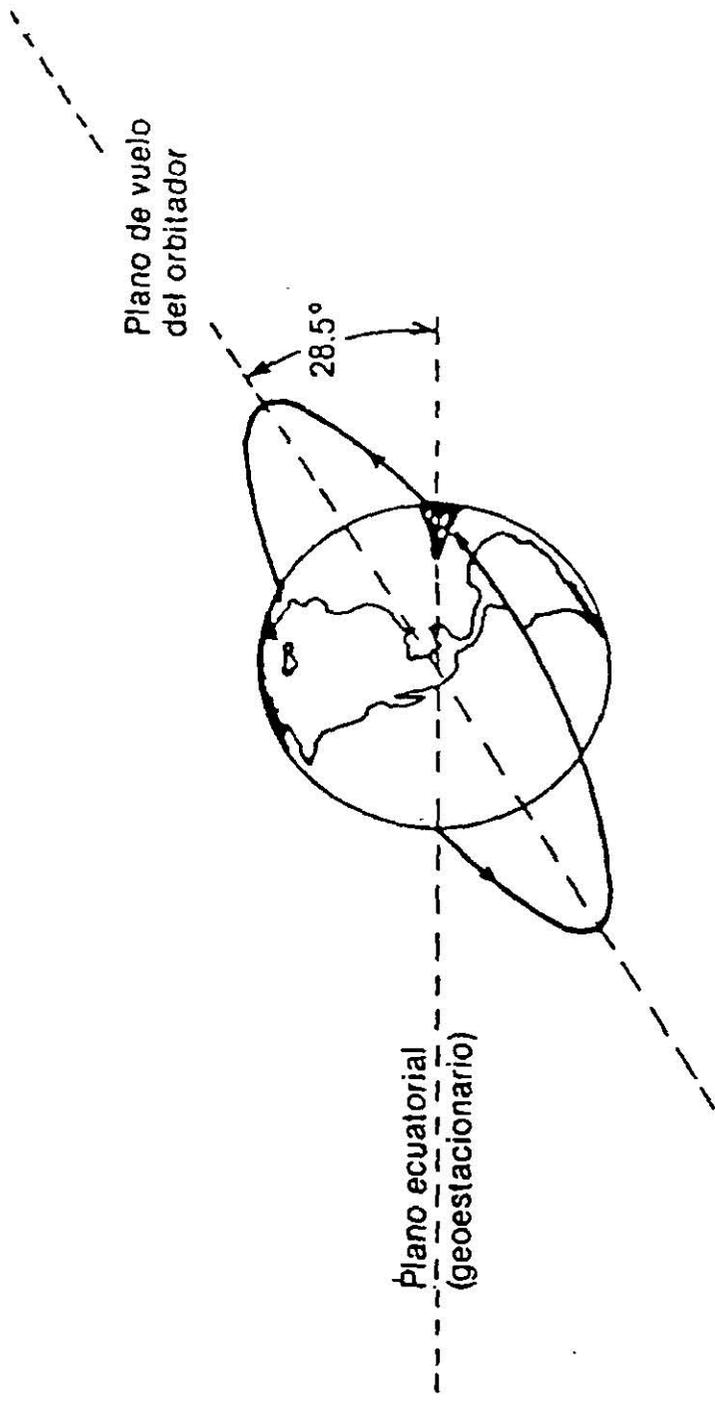
Los orbitadores de la NASA colocan al satélite en una órbita circular baja. Para que éste llegue a su posición geoestacionaria final deben seguirse otros dos pasos, mediante el encendido de un motor de perigeo y después el de un motor de apogeo. Como consecuencia del accidente del Challenger, pocos son los satélites comerciales que la NASA lanzará con sus orbitadores en los próximos años.

EL ORBITADOR Y LA ORBITA DE HOHMANN.

Una de las varias aplicaciones de los orbitadores norteamericanos es colocar satélites en órbita circular baja. El compartimiento de carga o bodega de un orbitador tiene 18.3 m de largo y 4.6 m de diámetro, y en él se puede colocar uno o varios satélites, dependiendo de las dimensiones y peso que cada uno de ellos tenga. Cada satélite se coloca sobre una mesa de giro que posteriormente ser activada durante la misión, poco antes de que se deje el satélite en órbita circular baja.

El orbitador despegas desde Cabo Kennedy, situado a 28.5º de latitud norte, y pocos minutos después entra en órbita circular alrededor de la Tierra, a una altura promedio de 300 km sobre el nivel del mar; el plano de la órbita de vuelo forma un ángulo de 28.5º con respecto al plano ecuatorial (como se muestra en la siguiente figura). Antes de liberar o soltar al satélite del compartimiento de carga, el astronauta responsable de hacerlo debe de utilizar una de las computadoras y una pantalla fosforescente para verificar que todos los elementos que forman al satélite se encuentren en buenas condiciones; es decir, se revisa su estado de salud. Esta es una gran ventaja que presentan los orbitadores, puesto que en el caso de que el ascenso alguna parte del satélite se haya dañado, aún se tiene alternativa de tratar de repararlo, o bien de traerlo de regreso a la Tierra, cosa que no es posible hacer con ningún otro tipo de lanzamiento actual.

Cuando el astronauta ha verificado que las partes del satélite se encuentran en orden, procede a dar a la computadora las instrucciones para activar los mecanismos de liberación. Se activa la mesa de giro sobre la que va colocado el satélite, hasta que alcanza una velocidad angular de aproximadamente 50 revoluciones o vueltas por minuto, y el momento en el que el orbitador intersecta el plano ecuatorial, se desactiva un sistema de resortes de presión, que lleva una gran cantidad de energía potencial almacenada; al tratar de retomar su condición física original, los resortes empujan al satélite hacia afuera, actuando como si fueran una catapulta. El satélite se ha separado del orbitador, girando como un trompo, lo cual le da estabilidad giroscópica, y se aleja cada vez más de la nave debido al movimiento inercial adquirido. Sin embargo, la órbita del satélite sigue siendo circular, como cuando iba almacenado en el compartimiento de carga del orbitador; además, el plano sobre el cual viaja sigue formando un ángulo de inclinación de 28.5º. El procedimiento que se utiliza para llevar al satélite a su posición final se basa en los trabajos que el científico alemán Walter Hohmann desarrolló. El objetivo del procedimiento es realizar los cambios de órbita y plano de desplazamiento con el menor consumo de energía posible. Esto se logra al pasar al satélite de su órbita circular baja a una elíptica muy alargada, conocida como órbita de transferencia de Hohmann.



Cuando el orbitador pasa por el plano ecuatorial, el satélite es liberado del compartimiento de carga. Al igual que el orbitador, queda en órbita circular baja, inclinada 28.5° con respecto al plano ecuatorial. Se encuentra ahora en órbita circular baja.

En resumen, las condiciones para que el satélite guarde una órbita geoestacionaria son las siguientes:

- 1.- La órbita debe ser circular.
- 2.- La órbita debe ser ecuatorial.
- 3.- La altura sobre el nivel del mar debe ser 35,890 km.
- 4.- El satélite debe desplazarse en el mismo sentido de rotación de la tierra.

Al cumplir con estas condiciones se logra un período de 24 horas lo cual aunado a la órbita ecuatorial alrededor del mismo eje de rotación de la tierra permite la sincronización y por lo tanto, la órbita geoestacionaria lo cual es derivada de los criterios de equilibrio entre las fuerzas centrífuga y de la atracción mecánica espacial la cual rige el movimiento de los planetas y de nuestros satélites artificiales. Una vez que el satélite se fija en su posición es necesario estabilizarlo y corregir su posición constantemente ya que existen fuerzas externas que se encargan de moverlo. Los subsistemas de propulsión son los encargados de realizar estas maniobras. Los motores de maniobra y los motores de orientación son alimentados normalmente por combustibles que operan propulsores químicos, el ms utilizado es la Hidrazina Monopropelente aunque la tendencia apunta hacia la utilización de sistemas bipropelentes, (con dos propelentes distintos: un combustible y un oxidante). De hecho, es este combustible el que determina la vida útil del satélite el cual en promedio es de 14 años.

PERIODO ORBITAL.

En este sistema el satélite conserva una órbita ecuatorial de aproximadamente 24 horas, de período orbital. Este período orbital, para el caso de una órbita circular, se encuentra definido por la ley de Keppler, que enuncia lo siguiente:

$$P_o^2 = \frac{4(\pi)^2(R + h)^3}{\mu}$$

donde:

P_o = período orbital (seg)

R = radio de la tierra (m)

h = altura del satélite (m)

μ = constante de Keppler (3.99×10^{14} m/seg²)

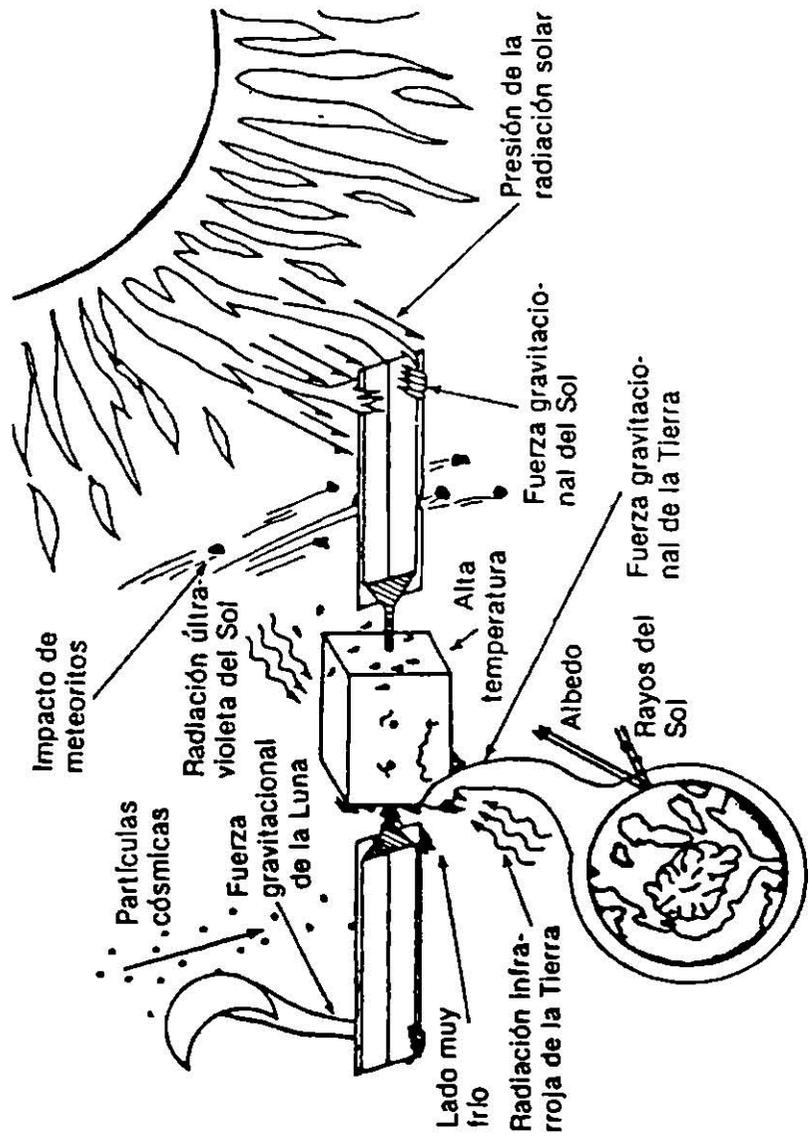
Ecuación derivada de los criterios de equilibrio entre las fuerzas centrífugas de atracción gravitacional. Para un periodo orbital aproximadamente de 24 horas, el satélite se encuentra a una altura aproximada de 35,890 km., tomando automáticamente la condición estacionaria, para un observador desde la Tierra.

FACTORES QUE AFECTAN AL SATELITE EN EL ESPACIO.

La fuerza que más le afecta es el campo gravitacional de la Tierra. Este campo no es esféricamente uniforme, pues la distribución de la masa del planeta no es homogénea. es decir, si se imaginase a una gran esfera en cuyo centro est, el centro de la Tierra, y si pudiese medirse de alguna forma la intensidad del campo gravitacional en todos los puntos de la superficie de esa gran esfera imaginaria envolvente, no se obtendría el mismo valor en todos los puntos, o sea, que la intensidad del campo gravitacional no es exactamente igual sobre un punto del océano Pacífico que sobre un punto en continente africano, aún cuando ambos puntos de medición estén a la misma altura sobre el nivel del mar.

Más aún, la Tierra no es una esfera perfecta, sino que está achatada en sus polos y el círculo ecuatorial no es en realidad un círculo, sino una elipse aunque de muy poca excentricidad; el eje mayor de ésta es 150 metros más largo que el eje menor. Para que se tuviese una uniformidad esférica del campo gravitacional de la tierra, en primer lugar ésta debería de ser una esfera perfecta, además su masa tendría que estar mezclada homogéneamente; ambas cosas son, por supuesto, imposibles dadas la manera en que se formó y a que gira sobre su propio eje.

La no uniformidad del campo gravitacional de la Tierra, combinado con el hecho de que la estructura del satélite tampoco tiene una masa homogénea, puesto que sus componentes est n fabricadas con una diversidad de materiales produce un par gravitacional. El campo gravitacional de la Tierra es la fuerza de mayor influencia sobre la orientación y posición del satélite debido al gran tamaño que tiene el planeta y a la relativa cercanía del satélite al mismo, pero la Luna también ejerce una ligera fuerza gravitacional perturbadora. Sin embargo, como esta última es mucho más pequeña que la Tierra y además se encuentra diez veces más lejos que el satélite que éste de la superficie del planeta, su defecto comparativo es mínimo al igual que en el caso de la fuerza gravitacional perturbadora del sol. Otra fuerza que también produce cambios en la orientación posición del satélite es la presión de la radiación solar sobre la superficie de su estructura. Esta fuerza acelera al satélite su efecto es mayor en satélites que tienen sus arreglos solares montados sobre paneles despleables o extensibles que sobre satélites de configuración cilíndrica, puesto que en el primer caso de la superficie total expuesta a la presión de la radiación solar es mucho



Fuerzas y otros factores que alteran la estabilidad del funcionamiento de un satélite.

mayor; el principal efecto de esta fuerza es cambiar la excentricidad de la órbita del satélite, y como la resultante no inside precisamente sobre su centro de masa, al mismo tiempo se produce un giro, que cambia su orientación con respecto a la superficie de la Tierra. El campo magnético de la tierra también produce un par o fuerza perturbadora sobre el satélite pero en realidad su efecto es despreciable en comparación con las fuerzas comentadas anteriormente.

Por último, la misma radiación radioeléctrica de las antenas del satélite produce una presión, cuyo efecto es importante cuando la potencia de transmisión del satélite es alta está concentrada en un as de iluminación muy angosto. Esta fuerza origina una fuerza del satélite, y para reducir al máximo su efecto sobre él, se debe diseñar con antenas colocadas simétricamente con respecto a su centro de masa, o bien, el eje de radiación principal de la antena debe contener dicho centro de masa.

El satélite está integrado por un gran número de elementos, todos ellos fabricados con distintos materiales diseñados para realizar funciones diversas. Por ejemplo, las celdas solares trabajan con mayor eficiencia entre -100°C y $+50^{\circ}\text{C}$, las baterías solamente entre 0°C y $+20^{\circ}\text{C}$, los tanques de combustible deben estar entre 10°C y 50°C ; el equipo electrónico los sensores infrarrojos entre otros componentes también requieren rangos específicos de temperatura para funcionar bien. Es preciso garantizar un control térmico eficaz en la estructura del satélite en cada uno de sus equipos para que no falle. El mecanismo para hacerlo es muy complejo, pues se necesita mantener un balance térmico entre la energía que el satélite recibe por la radiación de fuentes externas y la energía que, él mismo disipa internamente.

La principal fuente de radiación externa es el Sol, y aún cuando causa algunos problemas para conservar el balance térmico en el satélite, es obvio que sin él no sería posible generar electricidad a través de las celdas solares. El Sol permite generar electricidad para que el satélite funcione pero por otro complica el diseño del mismo. En todo momento el satélite tiene varias de sus partes expuestas a distintas temperaturas; mientras que la cara que está orientada hacia el Sol se calienta mucho, las partes no iluminadas se enfrían. En el interior del satélite, la transferencia del calor se lleva a cabo por conducción en el espacio por radiación, puesto que en el medio ambiente casi vacío excluye la posibilidad de que en este último se pueda transferir por convección.

Existen, además, otras cuya aparición y efecto son impredecibles, producidas por el impacto de los meteoritos. Cuando hay una colisión de un meteorito con el satélite, el primero le transmite un momento al segundo, que modifica ligeramente su posición y orientación.

Por otra parte, cuando ocurre un eclipse el satélite no solamente se enfría muchísimo al interponerse la Tierra entre él y el Sol, sino que además no puede transformar energía solar en electricidad; en estas condiciones, necesita obtener su energía de alguna otra fuente para seguir funcionando. Esta fuente de respaldo está constituida por varias baterías que forman parte del satélite, gracias a ellas el servicio no se interrumpe durante un eclipse o la noche terrestre.

La radiación ultravioleta del Sol causa que los materiales del satélite se ionicen; esto produce un aumento en la conductividad de los aisladores cambios en las características de emisión y absorción de calor de los materiales protectores. Además, la misma radiación degrada poco a poco la eficiencia de las celdas solares que después de varios años de trabajo y de estar expuestas al sol reducen su eficiencia en un 20% a 30%.

El medio ambiente de casi vacío ocasiona por su parte que los metales y los semiconductores se sublimen y tiendan a evaporarse. La cantidad de masa que pierden depende mucho de la temperatura, pero en realidad estas pérdidas son despreciables siempre y cuando los materiales utilizados para proteger al satélite no sean muy delgados.

Hay otros efectos que pueden resultar más dañinos como es la posibilidad de que se condensen gases en superficies frías y produzcan un corto circuito en materiales aislantes. Como punto a su favor, el medio ambiente casi vacío tiene la ventaja de que elimina la posibilidad de que haya problemas por corrosión.

Adicionalmente las partículas cósmicas que insiden sobre el satélite ocasionan que sus plásticos se ionicen y que la eficiencia de sus celdas solares se degrade aún más; por si fuera poco, también pueden modificar el acabado de las superficies diseñadas para controlar su balance térmico.

PRINCIPALES SUBSISTEMAS DE UN SATELITE.

SUBSISTEMA DE ANTENAS.

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

Es fácil comprender que si el subsistema de antenas tuviese alguna falla, por ejemplo, si no estuviese bien orientado hacia la superficie de la Tierra debido a algún desperfecto en su mecanismo, entonces no sería factible transmitir correctamente desde el satélite ni recibir las señales provenientes de las estaciones terrenas.

Las antenas son al mismo tiempo el puerto de entrada y de salida de ese mundo electrónico que es el interior del satélite; son la interfase o etapa de transformación entre las señales electromagnéticas que viajan por el espacio y las señales que circulan dentro de varios de sus subsistemas.

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

Algo debe obtenerse de una antena grande a cambio de cubrir menos metros cuadrados sobre la superficie terrestre; la razón es sencilla: cuanto más grandes son las antenas, tienen la propiedad de una mayor capacidad para concentrar la energía en un haz electromagnético muy angosto, que ilumina pocas unidades cuadradas, pero que las irradia con niveles muy altos de densidad de potencia.

Por otra parte, cuanto más alto sea la frecuencia a la que una antena de dimensiones constantes trabaje, mayor su capacidad de concentración de energía; esta es una característica propia de las antenas parabólicas y, en general, de todas las antenas llamadas de apertura, cuya capacidad de concentrar la potencia en un haz invisible de radiación o iluminación muy angosto es función directa de sus dimensiones eléctricas y no de las físicas.

La dimensión eléctrica de una antena es igual a su dimensión física dividida entre lo que mide la longitud de onda a la frecuencia de operación, o sea, es el número de longitudes que cabrían alineadas en su apertura o boca. Por ejemplo, una antena parabólica de dos metros de diámetro que irradia energía a una frecuencia de 11 Ghz, lo hace dentro de un haz de iluminación más angosto que como lo haría si tuviese que operar a una frecuencia de 4 Ghz, simplemente porque cuanto más alta es la frecuencia, la longitud de onda electromagnética es más corta y el tamaño eléctrico de la antena aumenta.

La huella de iluminación es la intersección del haz radiado por la antena con la superficie de la Tierra. Imaginemos el lector que tiene una lámpara de mano que en lugar de proyectar un círculo sobre la pared, o bien una elipse al inclinar la lámpara, proyecta una mancha irregular, por ejemplo, el perfil de una papa. Imaginemos ahora un globo gigante transparente e iluminémoslo con una lámpara; la intersección del haz de iluminación irregular o de contorno con el globo sería precisamente la huella de iluminación de la lámpara, o sea la cobertura que tiene de una parte de la superficie curva del globo.

La antena de telemetría y comando se encarga de recibir las señales que contienen órdenes emitidas por el centro de control en la Tierra, tales como llamadas telefónicas, programas de televisión, información digital de empresas, etc., para que se efectúe alguna corrección a bordo; además es el responsable de enviarle al centro de control señales que contienen información vital sobre el estado de operación de todo el satélite, para hacer modificaciones en caso de ser necesarias. Esta antena no es parabólica ni de corneta, pues estas son altamente direccionales; normalmente es una antena bicónica, cuya radiación es casi omnidireccional, es decir, que emite más o menos con la misma intensidad en todas direcciones; de esta forma, aun con el centro de control no se interrumpe y se sigue teniendo control sobre el mismo.

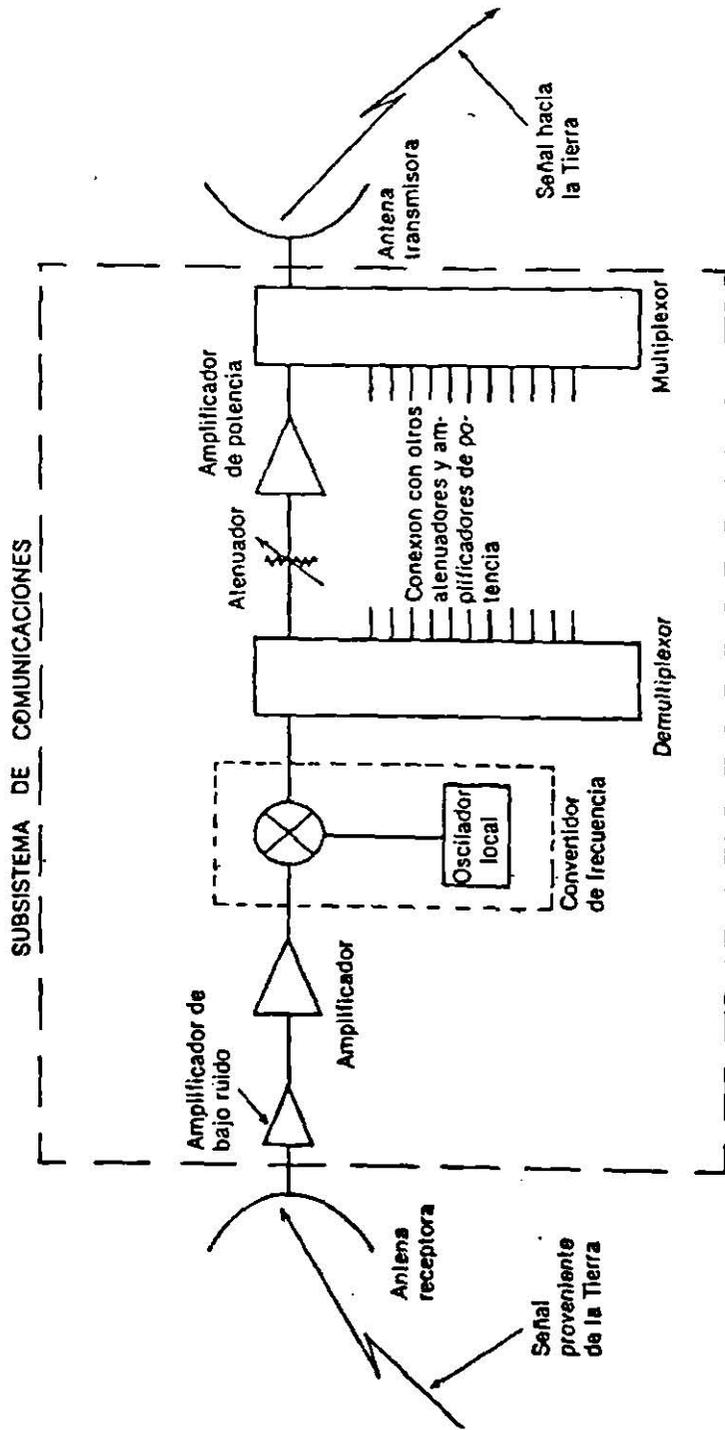
SUBSISTEMA DE COMUNICACIONES.

Los principales pasos del proceso de la información son amplificar las señales a un nivel de potencia adecuado, para que puedan ser recibidas a su regreso con buena calidad, así como cambiarlas de frecuencia, para que salgan por el conjunto de antenas sin interferir con las señales que estén llegando simultáneamente. El subsistema de comunicaciones realiza estas funciones mediante filtros, amplificadores, convertidores de frecuencia, conmutadores y multiplexores.

A la trayectoria completa de cada receptor, comprendiendo todos sus equipos desde la salida de la antena receptora hasta la entrada de la antena transmisora se le da el nombre de TRANSPONDEDOR, el número de ellos depende del diseño del satélite. Asignar trayectorias o transpondedores en los que deben ir los diferentes servicios, como los canales de televisión, telefonía y datos, con sus correspondientes niveles de potencia, así como el espacio que deben ocupar dentro de cada amplificador es responsabilidad de los ingenieros de comunicaciones.

Al rango de frecuencias que hay entre la frecuencia más baja y la más alta de las que se transmiten se le da el nombre de ANCHO DE BANDA. Cuanto mayor sea éste en un equipo, ser más capaz de trabajar de igual forma dentro de un mayor rango de frecuencias; por ejemplo, si se trata de un equipo de recepción, puede recibir con la misma calidad más canales de televisión, telefonía o datos que otro cuyo ancho de banda de operación sea menor. Las antenas receptoras y lo mismo se aplica para las antenas transmisoras, tienen un ancho de banda muy grande, suficiente para operar a las frecuencias asignadas para los satélites de comunicaciones, cuya mayor parte funciona actualmente en las bandas de frecuencia C y Ku. En cada una de estas bandas, el ancho de banda de operación o sea, el rango de frecuencias disponibles, es de 500 Mhz para transmisión y 500 Mhz para recepción. Existen satélites denominados híbridos, los cuales pueden trabajar tanto en banda C como en la Ku al mismo tiempo.

En la banda C, las frecuencias que se utilizan para transmitir de la Tierra hacia el satélite están entre 5.925 y 6.425 Ghz. La antena receptora del satélite detecta todas estas frecuencias, con una frecuencia central de 6.175 Ghz. Los transpondedores cambian las frecuencias de todas las señales contenidas en el rango, bajándolas a otro de igual ancho de banda, pero cuyos límites inferior y superior son, respectivamente, 3.7 Ghz y 4.2 Ghz; posteriormente, todas las señales contenidas en estas últimas frecuencias son entregadas a la antena transmisora, para que las envíe de regreso a la Tierra.



Relación entre los subsistemas de antenas y comunicaciones.

En la banda Ku, todo el proceso es similar al de la banda C solo que las frecuencias Tierra-satélite están entre 14 y 14.5 Ghz, con una frecuencia central de 14.25 Ghz, y las frecuencias satélite-Tierra están entre 11.7 y 12.2 Ghz; en este caso, el enlace se representa con la nomenclatura 14/12 Ghz.

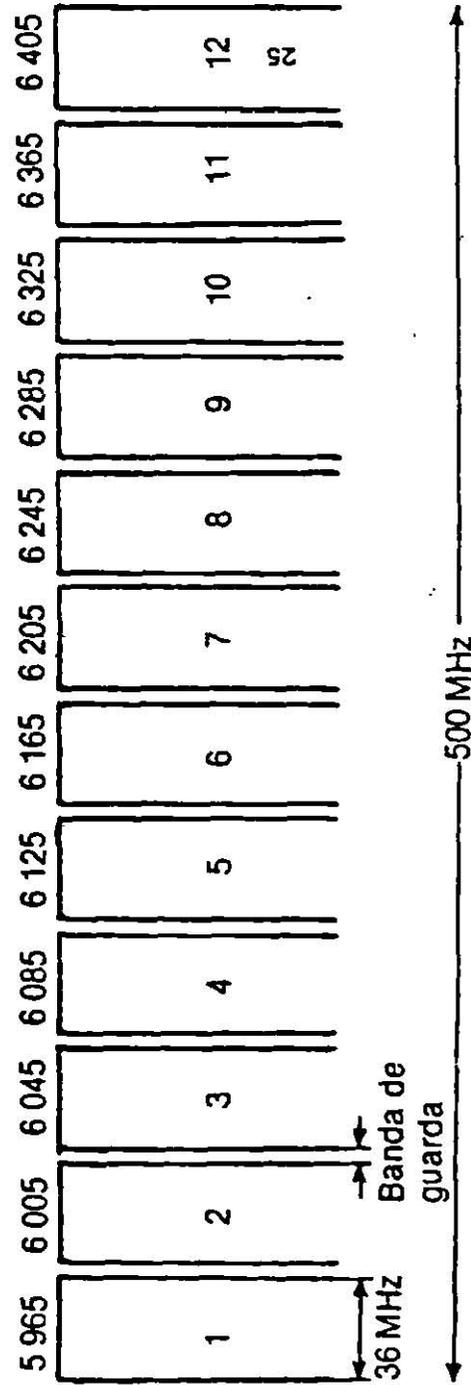
Cuando un canal de televisión se transmite por satélite, al modularlo en frecuencia ocupa normalmente sólo 36 de los 500 Mhz disponibles, y técnicamente esa ocupación puede hacerse en cualquier parte dentro de ese rango. Por conveniencia, el ancho de banda de 500 Mhz se divide en espacios o ranuras, cuyo número depende de la aplicación del satélite.

En la siguiente figura se muestra una división usual del ancho de banda de un satélite en 12 ranuras de 36 Mhz de ancho de banda cada una. Los espacios libres entre ranuras adyacentes se dejan para disminuir la posibilidad de interferencia entre las señales que cada una contiene. Cada ranura puede trabajar con un canal de televisión independientemente, por lo que la capacidad total del satélite en esta banda C de operación sería igual a 12 canales de televisión. También sería posible que en cada ranura cupiesen 2 canales de televisión o cientos de canales telefónicos y de datos.

De acuerdo con la figura, la frecuencia central del transpondedor número 4 es de 6.085 Ghz; o sea, que esta es la frecuencia central con la que estaría enviando el canal de televisión de la Tierra hacia el satélite. Hay que recordar que la antena receptora del satélite no capta solamente las frecuencias que corresponden al rango del transpondedor número 4, sino todas las frecuencias de los 12 transpondedores. Es decir, por ella entran diferentes clases de señales al mismo tiempo, que bien podrían ser en un momento dado 6 ó 7 canales de televisión, miles canales telefónicos o algunos canales de datos. Para la antena esto no representa ninguna dificultad, pero no es fácil construir aparatos electrónicos de alta frecuencia que realicen sus funciones de amplificación óptimamente con todas esas señales al mismo tiempo.

Es necesario aislarlas, para procesarlas y amplificarlas por separado, y ésta es una de las razones principales por las que se divide el ancho de banda del satélite en transpondedores; después del proceso, todas las señales se vuelven a juntar o agrupar, para que la antena transmisora las envíe hacia la Tierra.

FRECUENCIAS CENTRALES (MHz)



Ancho de banda de un satélite que opera en la banda C, dividido en ranuras de frecuencias de 36 MHz cada una. Cada ranura corresponde a las frecuencias de trabajo de un transmisor, y las frecuencias centrales que se indican son las que se usan para transmitir de la Tierra al satélite. Para la transmisión satélite-Tierra se hace una división similar del ancho de banda comprendido entre 3.7 y 4.2 GHz, con sus frecuencias centrales correspondientes.

Dentro del subsistema de comunicaciones se encuentra el primer dispositivo electrónico importante que se encuentran las señales recibidas por la antena, que es el amplificador de bajo ruido, con poca potencia de salida; este aparato genera internamente muy poco ruido, que se suma a las señales originales que entran a ,l para amplificación. Todos los dispositivos electrónicos generan ruido, principalmente por su calentamiento. La primera etapa de amplificación es muy importante, porque cualquier señal recibida por la antena es muy débil, debido a la distancia que tiene que recorrer.

Es importante que el ruido generado por este primer dispositivo de amplificación común sea lo más bajo posible, éste dispositivo tiene un ancho de banda muy grande, de 500 Mhz, debido a que debe de ser capaz de amplificar al mismo tiempo todas las señales recibidas por la antena, antes de que se proceda a separarlas entre sí, por medio de filtros, para realizar las siguientes etapas del proceso que se lleva a cabo en éste subsistema.

Del amplificador de bajo ruido depende que la información siga fluyendo o no dentro del satélite, por lo que se debe de contar con un duplicado, es decir, es un sistema redundante.

Hasta este momento, lo único que se ha hecho es aumentar ligeramente el nivel de potencia de la señales. Cuando han alcanzado un nivel adecuado, pasan por un dispositivo conocido como convertidor de frecuencia, que no es más que un oscilador local que multiplica las señales que entran por otra generada internamente, las señales obtenidas a la salida del aparato son similares a las que entraron, por lo que respecta a su contenido, pero han sido desplazadas a frecuencias más bajas en el espectro radioeléctrico.

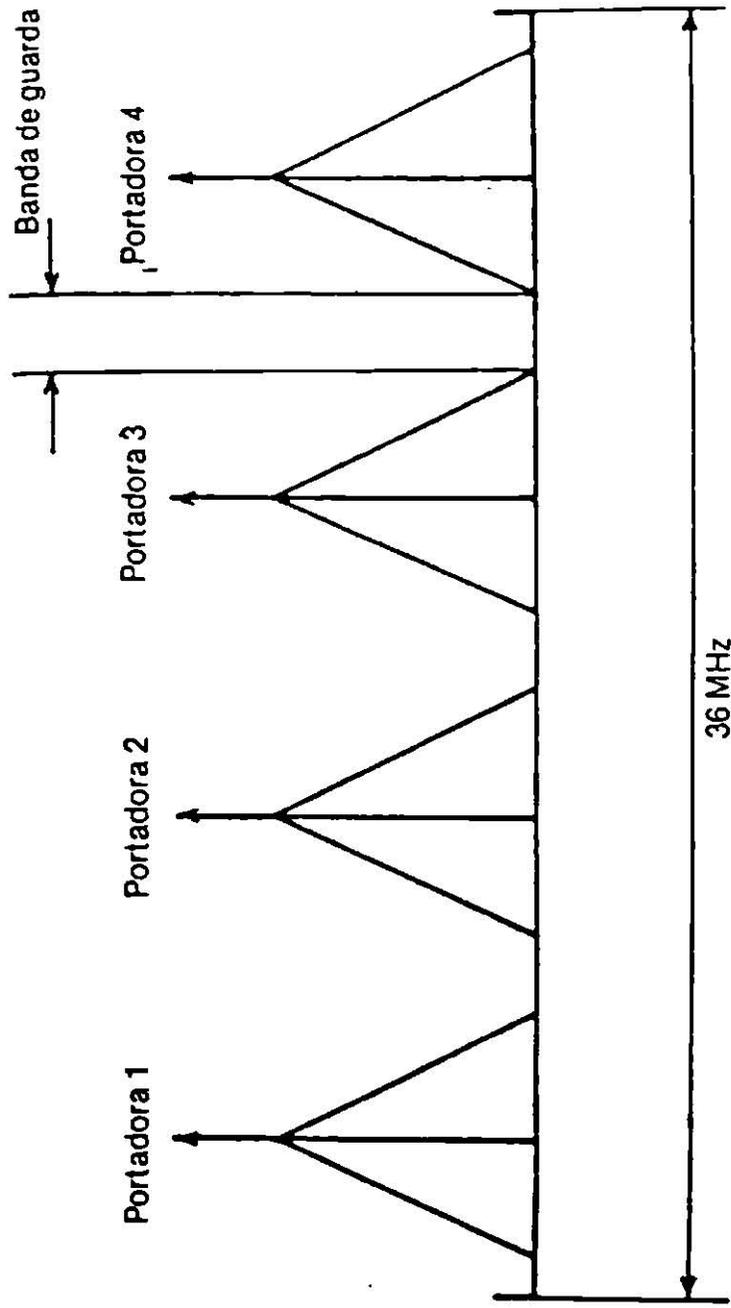
El siguiente paso es separarlas en grupos por medio de un demultiplexor, que tiene un solo conducto de entrada y varios de salida. A ,l entra la información completa de 500 Mhz de ancho de banda, y en su interior, mediante filtros, se separan los canales en bloques de 36 Mhz cada uno. A continuación, cada bloque pasa por una etapa muy fuerte de amplificación, proporcionada por un amplificador de potencia, y después todos los bloques son reunidos nuevamente en un solo conjunto de 500 Mhz de ancho de banda, a través de un multiplexor, conectado a la antena transmisora del satélite. Existe dentro de este subsistema un atenuador o resistencia variable, que se encuentra después de cada salida del demultiplexor, que sirve para disminuir a control remoto, y en distinto grado, la intensidad del bloque de señales que entra a cada amplificador de potencia.

Cuando los amplificadores de potencia del satélite entregan a su salida el máximo de potencia posible, se dice que están operando en su punto de saturación; para que esto ocurra, la potencia total de las señales que entran en ellos debe tener un valor determinado. Sin embargo, no siempre es necesariamente deseable obtener a la salida de un amplificador de potencia la máxima salida, es decir, operarlo en saturación, todo depende de la clase de información que contenga el bloque que se va a amplificar.

Cuanto mayor sea la intensidad de las señales que llegan al satélite se obtienen mejores resultados en la primera etapa de amplificación, ya que la relación entre la potencia de la señal amplificada y la potencia de ruido térmico generado internamente es mayor, y como la calidad con la que finalmente la señal se recupera en la Tierra depende, entre otros parámetros, de esta relación de potencias, se obtiene entonces una mejor fidelidad.

Todo tipo de información que se transmite al satélite tiene una frecuencia asignada, denominada portadora, por ejemplo, un canal de televisión tiene su propia frecuencia portadora, y la combinación de 60 canales telefónicos en un solo grupo también tiene la suya. De igual forma, un canal digital que contenga datos, sin importar si es de alta o baja velocidad, requiere tener su propia frecuencia portadora. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de lo que podría contener un transpondedor de 36 Mhz de ancho de banda, en donde el espacio de frecuencias disponibles es ocupado por cuatro señales similares en amplitud y ancho de banda, con su propia frecuencia portadora; cada señal contiene 192 canales telefónicos agrupados y proviene de una ciudad distinta.

En el ejemplo anterior, el número de frecuencias portadoras que entrarían al amplificador de potencia sería mayor de uno e igual a cuatro y como la característica entrada-salida del amplificador es lineal, se producirían internamente muchas señales adicionales e indeseables que a la salida se sumarían a la información original, distorsionándola. Estas señales indeseables se denominan en conjunto ruido de intermodulación, y su intensidad es cada vez mayor, conforme se trata de obtener más y más potencia a la salida del amplificador, hasta llegar quizá a la máxima posible, correspondiente al punto de saturación. Por esta razón, es preciso operar al amplificador de potencia en un punto de trabajo inferior al de saturación, para reducir así el ruido de intermodulación y su efecto sobre la información original, aunque para ello tenga que sacrificar potencia de salida. Los atenuadores permiten regular la intensidad de las portadoras y entregar menos o más potencia a la entrada del amplificador para que a su vez salga de él menos o más amplificación de potencia, con un nivel aceptable de ruido de intermodulación.



Esta sería una posible configuración de la ocupación del espacio de frecuencias de un transpondedor de 36 MHz, por ejemplo, del número 8 de la figura 3.8. Cada triángulo representa una señal de telefonía que contiene 132 canales telefónicos individuales y tiene asignada su propia frecuencia portadora. La banda de guarda entre señales adyacentes se deja para reducir la interferencia entre ambas, y su ancho siempre es función del tipo de señales que vayan a sus lados.

SUBSISTEMA DE ENERGIA ELECTRICA.

La cantidad de potencia requerida por cada satélite en particular depende de sus características de operación, y normalmente varía entre los 500 y 2,000 watts. Este subsistema depende de tres elementos fundamentales: una fuente primaria, una fuente secundaria y un acondicionador de potencia; este último está integrado por dispositivos como reguladores, convertidores y circuitos de protección, que permiten regular y distribuir la electricidad con los niveles adecuados a cada una de las partes del satélite.

La fuente primaria de energía del satélite está constituida por arreglos de celdas solares. Una gran desventaja que actualmente tienen las celdas solares es que su factor de eficiencia es la conversión de energía solar a eléctrica es muy bajo. Con el arseniuro de galio que ofrece una eficiencia del 18% aproximadamente, se puede obtener un determinado voltaje usando menos celdas conectadas en serie que el número que se requiere cuando se emplean celdas de silicio (eficiencia aproximada de 12%); además de esto, las primeras tienen la ventaja de que son menos dependientes de la temperatura, pero todavía son muy caras y densas, y pasarán varios años antes de que comiencen a utilizarse a gran escala.

Las celdas solares funcionan bajo el principio del efecto fotovoltaico; cuanto mayor sea la densidad de flujo de la radiación solar sobre ellas, mayor es la electricidad que generan. El efecto fotovoltaico también depende de la temperatura a la que están expuestas las celdas solares; cuanto más baja sea esta, mayor será el nivel de voltaje entregado por las celdas. Todas las celdas se ven expuestas durante su vida de operación a diversos tipos de radiaciones, que año tras año van disminuyendo su eficiencia aún más; después de unos 7 años de operación, la reducción de su eficiencia puede disminuir aproximadamente en un 30% con respecto a la eficiencia original, aun cuando llevan una cubierta de protección hecha de sílice fundido.

La distancia entre el satélite y el Sol y el movimiento aparente del Sol con respecto al satélite, ocasionan que en diferentes épocas del año se tenga más o menos energía eléctrica disponible, siendo máxima durante los equinoccios y mínima en los solsticios.

SISTEMA DE ENERGIA ELECTRICA

- Celdas solares

- Silicio
 - convencional
 - eficiencia: aprox. 12%

- Arseniuro de Galio (Ga As)

- estado del arte
- mayor eficiencia (aprox. 16%)
- mayor masa/quebradiza.

- Baterías

- Níquel-Cadmio (Ni Cd)

- convencionales
- pesadas

- Níquel-Hidrógeno (NiH₂)

- estado del arte
- doble eficiencia por kg.

Durante su vida de operación, el satélite se ve expuesto a eclipses, por lo cual necesita obtener la energía eléctrica de alguna otra fuente de que no sea el Sol para poder seguir funcionando; ésta fuente secundaria o de respaldo la constituye un conjunto de baterías, que se cargan cuando las celdas solares se hallan expuestas al Sol y se descargan durante los eclipses o en las horas pico de mayor demanda de energía.

En el momento en que ocurre un eclipse ya sea de Tierra o de Luna, unos reveladores eléctricos detectan la disminución en el nivel de energía suministrada por las celdas a los equipos y conectan las baterías automáticamente. De esta forma, las baterías comienzan a descargarse poco a poco, mientras alimentan al satélite, y su operación se puede requerir durante muchos minutos, a veces más de una hora, dependiendo de la duración del eclipse.

Las baterías que más se utilizan en los satélites geostacionarios de comunicaciones son de níquel-cadmio; su eficiencia de potencia/peso es baja, pero se prefieren porque son muy confiables y de larga duración. Sin embargo, algunos satélites (Intelsat V y Spacenet) ya utilizan baterías de níquel-hidrógeno, que poseen importantes ventajas tecnológicas sobre las anteriores y que quizá poco a poco las irán reemplazando hasta el año 2,000.

Hay otros tipos de baterías que aún se encuentran en la etapa de investigación, por ejemplo, de plata-hidrógeno, litio y sodio.

SUBSISTEMA DE CONTROL TERMICO.

Uno de los factores que intervienen en el equilibrio en cuestión es el calor generado constantemente por el satélite en su interior, cuya principal contribución proviene de los amplificadores de potencia; la energía que absorbe del Sol y de la Tierra son otros factores que deben considerarse también.

La suma del calor generado internamente por el satélite más el producido por la absorción de energía del Sol y de la Tierra, menos el radiado por el satélite hacia el exterior, se debe mantener lo más constante posible, con pocas variaciones, de tal modo que el satélite funcione íntegra y correctamente. El control de este balance térmico es también muy importante cuando ocurre un eclipse, pues el satélite se enfría bruscamente al quedar en la oscuridad, y cuando está de nuevo expuesto a los rayos del Sol sufre otro cambio brusco de temperatura.

La transferencia del calor sobrante del satélite al vacío se efectúa por radiación; en su interior también se produce una ligera transferencia de calor entre sus partes, pero por conducción en la estructura. Con el fin de mantener lo mejor posible el equilibrio térmico, los especialistas en el diseño de satélites tienen a su alcance gran variedad de materiales que utilizan para proteger cada una de las partes del aparato. Por ejemplo, una sección del satélite va cubierta con un reflector óptico de cuarzo, semejante a un gran espejo, que rechaza el calor del exterior y al mismo tiempo lo transfiere del interior al vacío; los dispositivos electrónicos que generan más calor (como los amplificadores de potencia) se colocan junto a él.

Los colores también juegan un papel muy importante en el acabado de las partes del satélite, dependiendo del lugar que cada una de ellas ocupe en la estructura, al igual que las propiedades de absorción y emisión de los materiales. Entre otros acabados, también se utiliza en algunas secciones la pintura de aluminio; por tener una emittancia más baja que la pintura negra, así como una absorbencia también baja, las zonas recubiertas con pintura de aluminio son más calientes en la oscuridad de lo que serían si tuviesen un terminado con pintura negra.

El equilibrio térmico se altera drásticamente cuando ocurre un eclipse, pues en ese momento desaparece la contribución del calor proveniente del Sol, así como el albedo cuya influencia es mucho menor, modificándose la temperatura resultante total. Si no se tomase alguna medida de protección para estas condiciones especiales, el satélite sufriría un cambio térmico muy fuerte, enfriándose a tal grado que las componentes más sensibles a las bajas temperaturas dejarían de funcionar correctamente; uno de los elementos más sensibles al frío son, por cierto, las baterías, que irónicamente son las responsables de suministrar energía eléctrica al satélite durante un eclipse, y por lo tanto es posible contar con algún sistema de calefacción que se encienda cuando la temperatura comience a bajar en forma significativa.

Para tal efecto se utilizan caloductos que distribuyen en el interior el calor emitido por los amplificadores de potencia, así como calentadores eléctricos activados por termostatos o a control remoto. Los caloductos operan bajo el principio de la evaporación y condensación sucesivas de algún fluido en los extremos de un ducto; en el extremo donde está la fuente de calor (los amplificadores de potencia) el fluido se evapora, y en el otro se encuentra un radiador que transmite el calor al exterior del ducto, hacia las partes frías; esto ocasiona que el fluido se condense, pero al recircular en el interior del caloducto pasa nuevamente a la condición de evaporación, y así en forma sucesiva.

SUBSISTEMA DE POSICION Y ORIENTACION.

Para orientar al satélite hacia la zona geográfica de servicio, es necesario mantener la orientación de la estructura del satélite estable con respecto a la superficie de la Tierra, lo cual se obtiene mediante las técnicas de estabilización por giro o de estabilización triaxial. Independientemente del tipo de estabilización que se use, las fuerzas perturbadoras en el espacio no dejan de provocar cambios en la posición del satélite sobre su órbita y en su orientación con respecto a la superficie de la tierra.

Para conocer la posición, se requiere medir la distancia a la que se encuentra y en que dirección o ángulo con relación a algún punto de referencia sobre la Tierra. La distancia se mide transmitiendo una señal piloto hacia el satélite, que éste retransmite después, y la diferencia que se detecta en el centro de control entre las fases de la señal transmitida y la recibida es un indicador de lo lejos que se encuentran la medición del ángulo o la dirección en la que se halla se puede hacer por interferometría, empleando dos estaciones separadas por cierta distancia y comparando las señales piloto recibidas por cada una de ellas. Cuando se obtiene la posición máxima de recepción, se considera que la antena de la estación terrena esta perfectamente orientada hacia el satélite, y por lo tanto se puede conocer la dirección o ángulo con que éste se encuentra.

Por lo que se refiere a la determinación de la orientación del cuerpo del satélite con relación a la superficie terrestre se puede utilizar para ello una variedad de sensores, de los cuales los mas comunes son los de Sol y los de Tierra. Los sensores solares son dispositivos fotovoltaicos en los que se produce una corriente eléctrica cuya magnitud depende de la dirección de la radiación solar sobre ellos. Los sensores de Tierra miden la radiación infrarroja emitida por el planeta, utilizando para ello un dispositivo sensible al calor, como un bolómetro o una termopila.

El procedimiento de corrección de la posición y orientación del satélite se basa en comparar los resultados de las mediciones de los sensores con ciertos valores de referencia considerados como correctos, calcular a continuación las correcciones que deben hacerse para reducir esos errores o diferencias, y finalmente llevarlas a cabo mediante la operación de algún actuador o conjunto de actuadores montados en el satélite. Los más comunes, y que proporcionan niveles importantes en la magnitud de los pares necesarios de corrección, son los propulsores.

SUBSISTEMA DE PROPULSION.

Este subsistema opera según el principio de la tercera ley de Newton; mediante la expulsión de materia a gran velocidad y alta temperatura a través de toberas o conductos de escape, se obtienen fuerzas de empuje en sentido contrario. Hay propulsores químicos o eléctricos, pero los primeros son los de mayor uso porque proporcionan niveles de empuje cientos o miles de veces mas grandes que los eléctricos.

La eficacia de un propulsor se caracteriza por su empuje y el impulso específico del propelente que utilice. Cada tipo de propelente produce un incremento de velocidad diferente con cierta cantidad de masa consumida; cuanto menor sea la masa necesaria para producir un incremento de velocidad determinado mayor es el impulso específico del propelente. El impulso específico se puede definir como el empuje aplicado o producido por cada unidad de peso del propelente que se consume cada segundo; en consecuencia, tiene dimensiones de tiempo y se expresa en segundos. El principio básico mediante el cual operan los propulsores químicos es la generación de gases a muy alta temperatura en el interior de una cámara mediante la reacción química de propelentes, y los gases se aceleran al pasar por una tobera de escape cuya boquilla va disminuyendo poco a poco en su rea transversal y después se ensancha.

Un tipo de propulsión es la hidrazina monopropelente, la cual es inyectada en una cámara donde se pone en contacto con un catalizador; como resultado, la primera se evapora y se descompone exotérmicamente en una mezcla de nitrógeno, hidrógeno y amoníaco, a temperaturas del orden de 300°C y con un impulso específico de unos 225 segundos. Este impulso se puede mejorar incrementando la temperatura de los gases mediante algún sistema de calentamiento resistivo, después de la descomposición catalítica, hasta unos $1,900^{\circ}\text{C}$, y antes de que se escapen por la tobera; de esta forma, el impulso específico aumenta hasta unos 300 segundos. Este importante incremento permite reducir la masa de propelente en el satélite antes de lanzarlo y colocarlo en órbita, pero a costa de un consumo mayor de energía eléctrica, pues hay que calentar la cámara de catalización.

En la actualidad existe cada vez mas la tendencia a utilizar sistemas bipropelentes, con los que no se emplea un catalizador, sino que dos propelentes distintos (un combustible y un oxidante) se ponen en contacto. Los propulsores eléctricos funcionan según el principio de generar un empuje al acelerar una masa ionizada dentro de un campo electromagnético, pero aún se encuentran en su etapa de pruebas y desarrollo.

SUBSISTEMA DE RASTREO, TELEMETRIA Y COMANDO.

Este subsistema permite conocer a control remoto la operación y posición del satélite, así como enviarle órdenes para algún cambio deseable se ejecute. El equipo de telemetría cuenta con diversos tipos de sensores instalados en varios cientos de puntos de prueba, que miden cantidades tales como voltajes, corrientes, presiones, posición de interruptores y temperaturas, etc. Las lecturas tomadas por los sensores son convertidas en una señal digital que el satélite transmite hacia la Tierra con una velocidad baja, entre 200 y 100 bits por segundo, lo cual permite conocer el estado de operación del sistema satelital, apoyado por la información de rastreo.

El rastreo se efectúa mediante la transmisión de varias señales piloto, denominadas tonos, desde la estación terrena de control hacia el satélite. Normalmente se utilizan de 6 a 7 tonos distintos, cuya frecuencia es de unos cuantos kilohertz, y que modulan sucesivamente en fase con la señal portadora de la estación terrena de control; el satélite recupera los tonos y remodula con ellos su propia portadora para retransmitirlos hacia la Tierra, en donde son detectados por el centro de control. Las señales recibidas en Tierra se comparan en fase con las transmitidas originalmente, y las diferencias obtenidas permiten calcular la distancia a la que se encuentra el satélite, con precisión de unas cuantas decenas de metros. La transmisión de las señales de telemetría y la retransmisión de los tonos de rastreo hacia la Tierra se realiza a través de un mismo amplificador a bordo del satélite, al igual que con las señales de comando que se hayan recibido, para que se verifiquen antes de que sean ejecutadas, como se muestra en la siguiente figura.

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

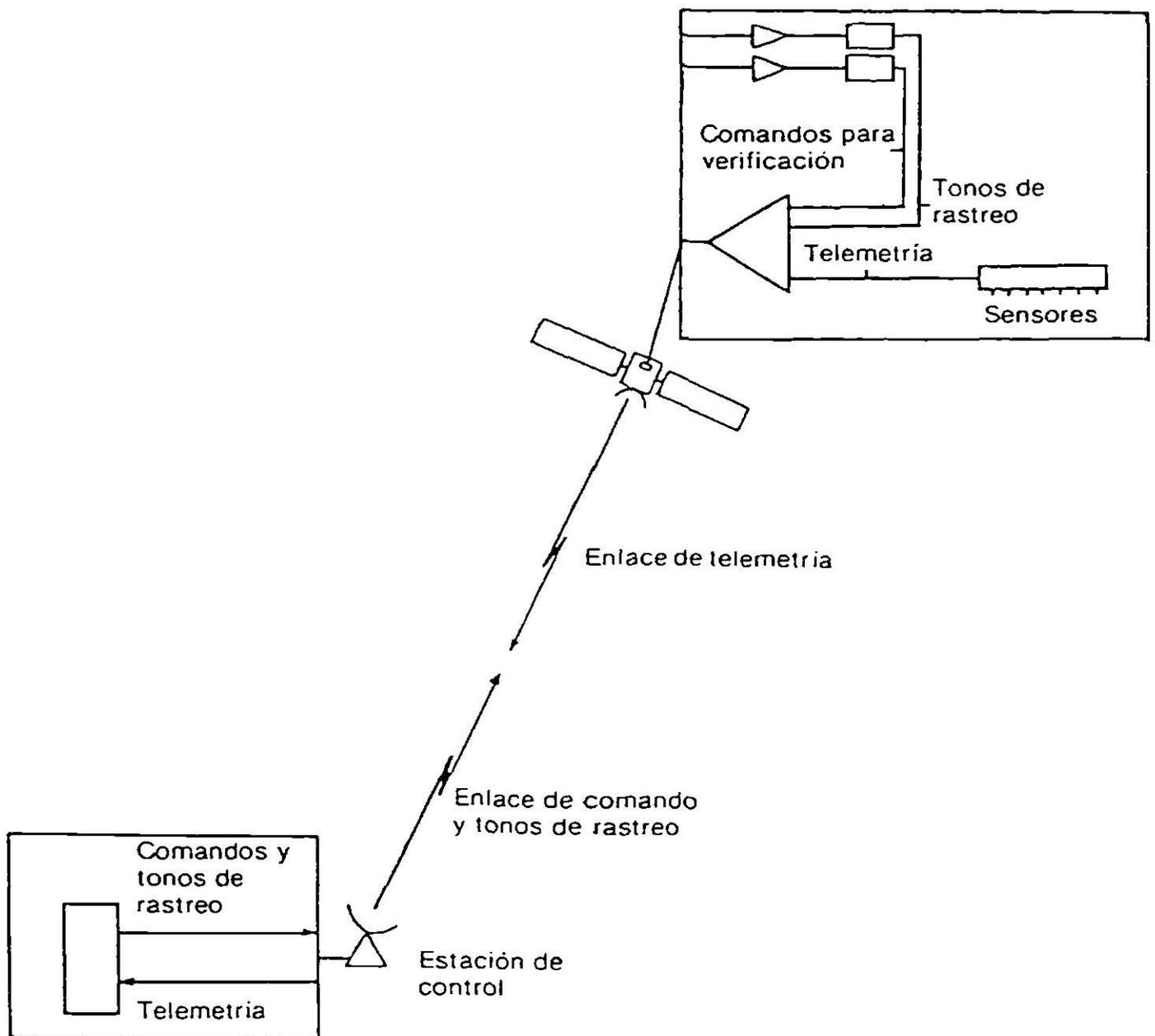


Figura 3.39 El subsistema de rastreo, telemetría y comando permite conocer y controlar la operación, posición y orientación del satélite.

SUBSISTEMA ESTRUCTURAL.

La estructura del satélite es la armazón que sostiene a todos los equipos que lo forman y que le da la rigidez necesaria para soportar las fuerzas y aceleraciones a las que se sujeta desde el momento en que abandona la superficie de la Tierra; éste importante subsistema debe de ser durable, resistente y lo mas ligero posible.

Los materiales más comunes para este fin son aluminio, magnesio, titanio, berilio, acero, y varios plásticos reforzados con fibra de carbón; de estos el berilio es el m s caro, y por tanto su utilización es limitada. Dependiendo del diseño (número y forma de las antenas, tipo de estabilización, número y potencia de los amplificadores, etc), la masa de la estructura puede variar entre 10 y 20 % del total de la masa del satélite; una buena parte de esa estructura (los cilindros o las paredes de la caja, según el caso) se fabrica con "panal de abeja" de aluminio, por su ligereza y rigidez excelentes.

DESCRIPCION DEL CIRCUITO HIPOTETICO DE REFERENCIA.

ESTACION TERRENA TRANSMISORA.

El equipo transmisor consiste básicamente en tres módulos: modulador, convertidor elevador y amplificador de alta potencia. El modulador de la estación combina la forma de la señal original con la señal portadora, modificando el ancho de banda de frecuencias y la posición de la información dentro del espectro radioeléctrico, la cual es transferida a frecuencias más altas; este paso de la señal modulada a frecuencia intermedia es el primero en su ascenso de conversión a microondas.

El convertidor elevador transfiere a la señal de la frecuencia intermedia (que dependiendo del sistema, puede tener una frecuencia de 70 Mhz, 140 Mhz, 1 Ghz, o más) a una posición dentro del espectro radioeléctrico en donde las nuevas frecuencias que la integran son mucho más altas que cuando salieron del modulador. La señal tiene ahora las frecuencias apropiadas para poder ser radiada hacia el satélite, pero su nivel de potencia es aún muy bajo, por lo que es preciso amplificarla antes de entregársela a la antena; para esto se utiliza un amplificador de alta potencia, del cual existen dos tipos:

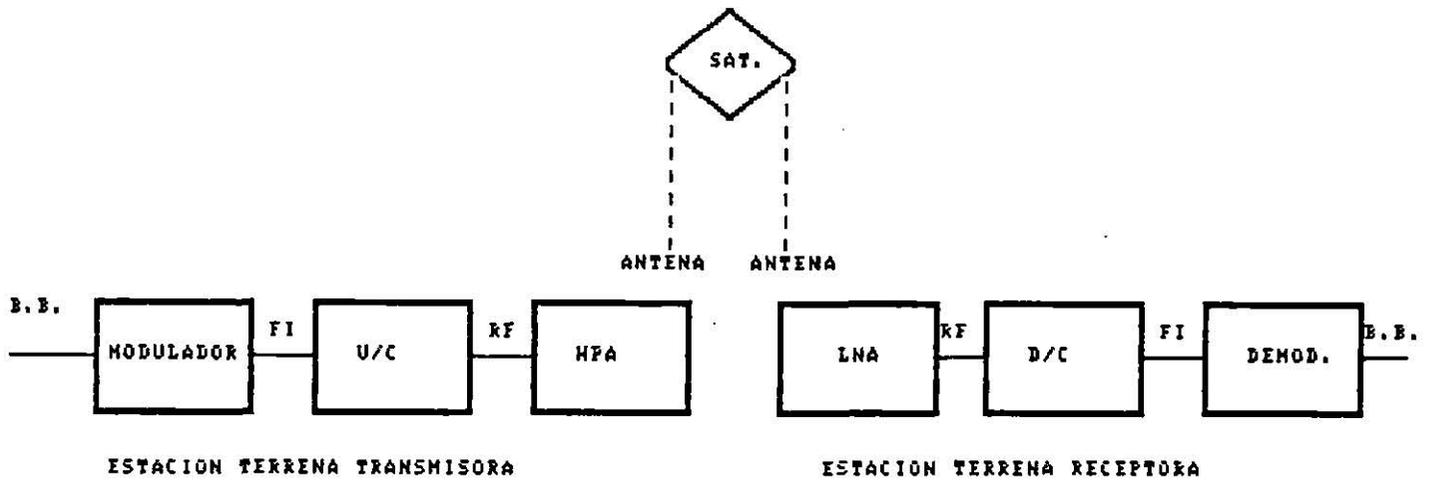
Un tubo de ondas progresivas que es un amplificador de microondas de ancho de banda muy grande, que abarca todas las frecuencias utilizables del satélite (500 Mhz o m s en algunos casos) por lo que puede amplificar simultáneamente a señales dirigidas hacia distintos transpondedores del mismo.

Un klistrón que es un amplificador de banda estrecha, suficiente para manejar uno o dos canales de televisión, varios cientos de canales telefónicos o algunos canales de datos de muy alta capacidad de transmisión.

Dada la posible pérdida de todo un enlace de comunicaciones si es que el amplificador de alta potencia falla, por norma general es común encontrar sistemas operativos en los que hay amplificadores de redundancia (en forma similar a como ocurre en los transpondedores del satélite). Por último, es importante señalar que, antes de su adquisición, las características de un amplificador de potencia se deben determinar tomando en cuenta el posible crecimiento del tráfico de la estación terrena.

Nota: el satélite de radiocomunicaciones se explicó anteriormente en el subsistema de comunicaciones.

CIRCUITO HIPOTETICO DE REFERENCIA



ESTACION TERRENA RECEPTORA.

La antena recibe las señales provenientes del satélite y a través del diplexor se las entrega a un amplificador de bajo ruido; éste funciona similarmente al amplificador de bajo ruido del satélite, por las mismas razones de que a su llegada la señal tiene una intensidad muy baja y de que es muy vulnerable ante cualquier ruido que se le pueda añadir antes de ser amplificada a un nivel aceptable. La antena y el amplificador de bajo ruido son los elementos más importantes de una estación terrena receptora y juntos definen la calidad de su operación.

Después del amplificador de bajo ruido van conectados en cadena un convertidor reductor de frecuencias y un demodulador, sin contar con algunos filtros intermedios. La señal de salida del amplificador contiene toda la información radiada por el satélite en una banda de operación con ancho de 500 Mhz, situada aún en la misma región del espectro radioeléctrico; el convertidor reductor tiene como función transferir toda esa información de 500 Mhz a una región más baja del espectro, centrándola en una frecuencia intermedia (FI) de recepción, es decir, haciendo una operación inversa al convertidor elevador de la estación transmisora.

La conversión de reducción de frecuencia se puede hacer en un solo paso, bajando de la frecuencia de llegada a la antena (que es la misma frecuencia en la que opera el amplificador de bajo ruido) hasta la frecuencia intermedia FI que se debe entregar al demodulador.

La señal de frecuencia intermedia que sale del convertidor reductor aún está modulada (ya sea en FM, PSK o alguna otra forma de modulación), y el paso siguiente para recuperarla en su forma original (banda base) es precisamente demodularla. En realidad, la señal nunca se recupera exactamente como era en su forma original, ya que diversos factores (como el ruido térmico y el de intermodulación), se encargan de distorsionarlo.

El grado de distorsión que se produce depende del tipo de modulación que se haya elegido, del nivel de potencia transmitida, de la ganancia de las antenas, y de otros parámetros del diseño del enlace.

La relación señal a ruido (S/N) es la medida de la calidad de la señal recibida y se especifica precisamente a la salida del demodulador.

Para cada clase de señal hay un estándar o S/N distinto. Por ejemplo, para una señal telefónica el estándar es de 50 dB, o sea, que la mayor parte del tiempo, la potencia de la señal que sale del demodulador y que contiene la información de la voz debe ser 100,000 veces mayor que la potencia del ruido que se le añade.

Por lo general la relación S/N debe ser aún mayor en el caso de señales de televisión, y su valor es fijado por el tipo de uso que se le vaya a dar (servicio rural, servicio urbano de distribución, estación casera, distribución de televisión de muy alta definición, etc.); por ejemplo, para el servicio rural o casero de recepción directa de TV quizá sea aceptable una S/N de 44 a 48 dB, pero para un servicio de distribución en una ciudad los enlaces procuran diseñarse de tal forma que la S/N sea de 53 dB o más durante la mayor parte del tiempo (99%), especialmente cuando se está operando en un medio comercial altamente competitivo.

ACCESO MULTIPLE.

Para que no ocurra ningún tipo de conflicto entre las señales que llegan simultáneamente al satélite, se establece un orden mediante una técnica de acceso múltiple, que se define como la capacidad para que un gran número de estaciones terrenas transmisoras conecten sus enlaces de comunicación correspondientes a través de un satélite común. Existen tres tipos: por división de frecuencia, por división en el tiempo, y por diferenciación de código; de éstos, el primero es el más común en la actualidad.

Acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), aquí todos los usuarios tienen acceso al satélite al mismo tiempo pero cada uno transmite en su propia y única banda de frecuencias. Esta es la forma de acceso múltiple más utilizada con la modulación analógica, donde las señales están presentes todo el tiempo.

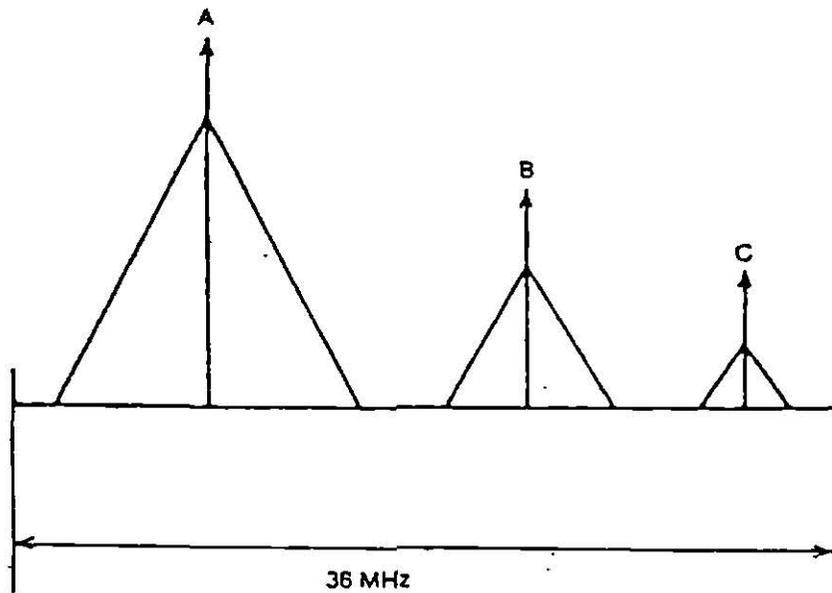
Este tipo de acceso tiene las siguientes ventajas:

- No se requiere de sincronización (cada estación transmite independientemente de las otras).
- La asignación de cada canal es simple y directa.

Desventajas:

- Los niveles de potencia de los enlaces ascendentes deben de ser estrechamente coordinados para hacer un uso eficaz de la potencia de salida de microondas de los transponders.
- El sistema está propuesto a intermodulación por lo que es necesario reducir la potencia (total del transponder) conforme aumenta el número de portadoras con la consecuente pérdida de eficiencia.

La figura muestra un ejemplo de FDMA, supóngase que la ciudad se designa por la letra A, la de tamaño medio por B, y la población rural por C. Es evidente que, si las tres transmiten al mismo tiempo, deben hacerlo con frecuencias portadoras diferentes para que no haya interferencia. Si la suma de los anchos de banda que requieren las tres estaciones individualmente da un total cercano a los 36 Mhz, entonces las tres ocuparán simultáneamente el mismo transpondedor del satélite, separadas por bandas de guarda.



Ocupación de un transpondedor de 36 MHz con acceso múltiple por división en frecuencia; cada señal proviene de una población diferente y tiene su propia frecuencia portadora asignada.

Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), aquí todos los usuarios transmiten por turno en su propia y única ranura de tiempo. Mientras est transmitiendo, cada ocupante tiene el uso exclusivo de uno o m s transponders. La naturaleza intermitente del TDMA lo hace particularmente atractivo para modulación digital. Un ejemplo se muestra en la siguiente figura.

Este acceso tiene las siguientes ventajas:

- **No se comparte la potencia y no se presentan problema de intermodulación.**
- **El sistema es flexible en cuanto a la PIRE que cada usuario transmite en cada enlace ascendente.**

Desventajas:

- **Se requiere una sincronía perfecta en la red.**
- **Se requiere de una gran capacidad de almacenamiento si la trama es larga.**

Acceso múltiple por división de código (CDMA), las estaciones terrenas transmiten simultáneamente señales codificadas distribuidas en todo el ancho de banda asignado. Los sistemas decodificadores reciben las transmisiones combinadas provenientes de diferentes estaciones y recuperan cada uno de ellos. Un ejemplo de éste se muestra a continuación.

En cualquiera de las tres clásicas formas de acceso múltiple cabe otra subdivisión: si el acceso al satélite es permanente de parte de una estación terrena transmisora el acceso se conoce como fijo o por pre-asignación. Si el acceso es temporal y compartido se le conoce como asignación por demanda.

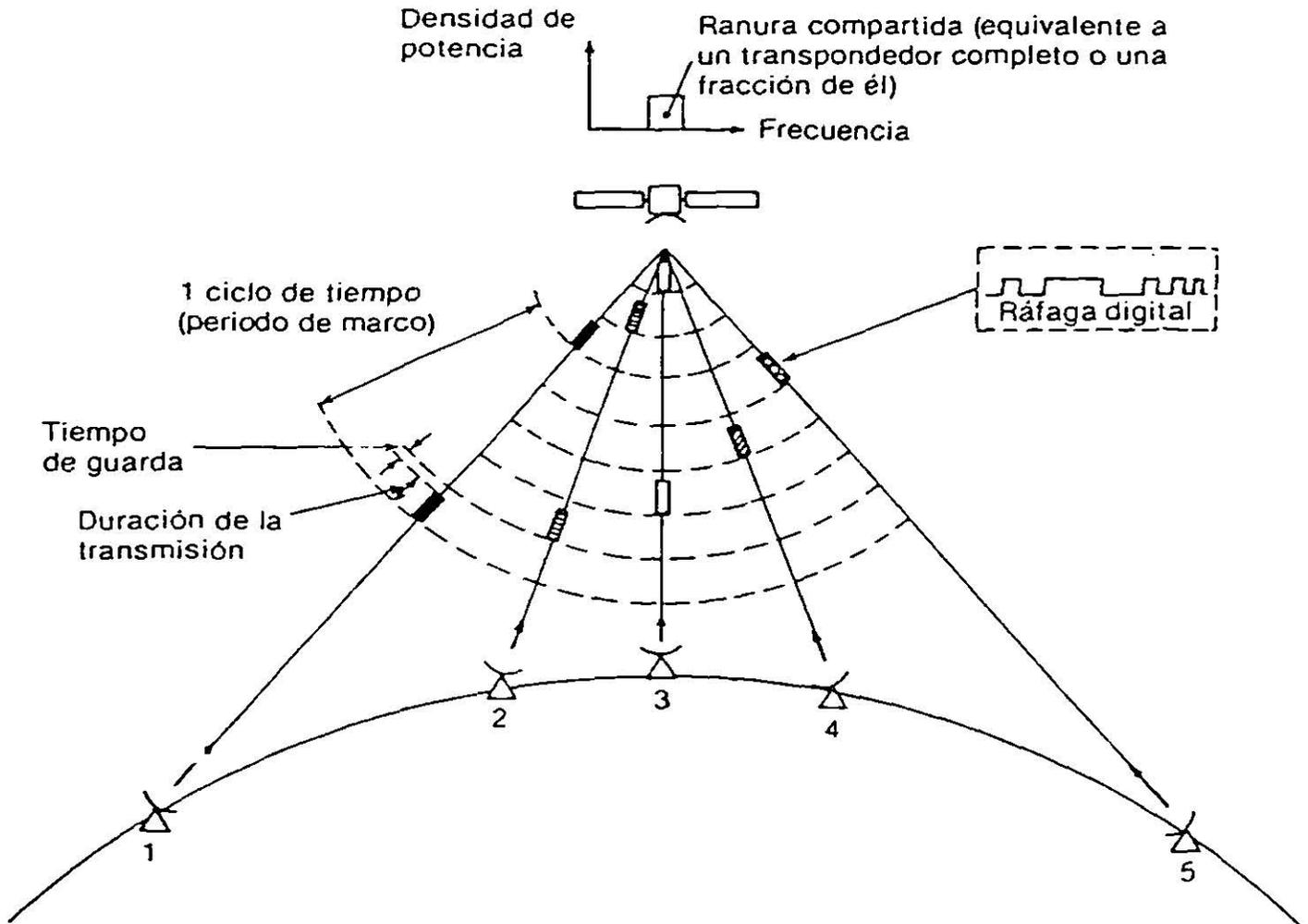


Figura 3.20 Red de cinco estaciones terrenas que comparten una misma ranura de frecuencias en un transpondedor mediante acceso múltiple por división en el tiempo con asignación fija y tiempos iguales por estación. Todas las estaciones transmiten su ráfaga digital a la misma frecuencia en forma secuencial.

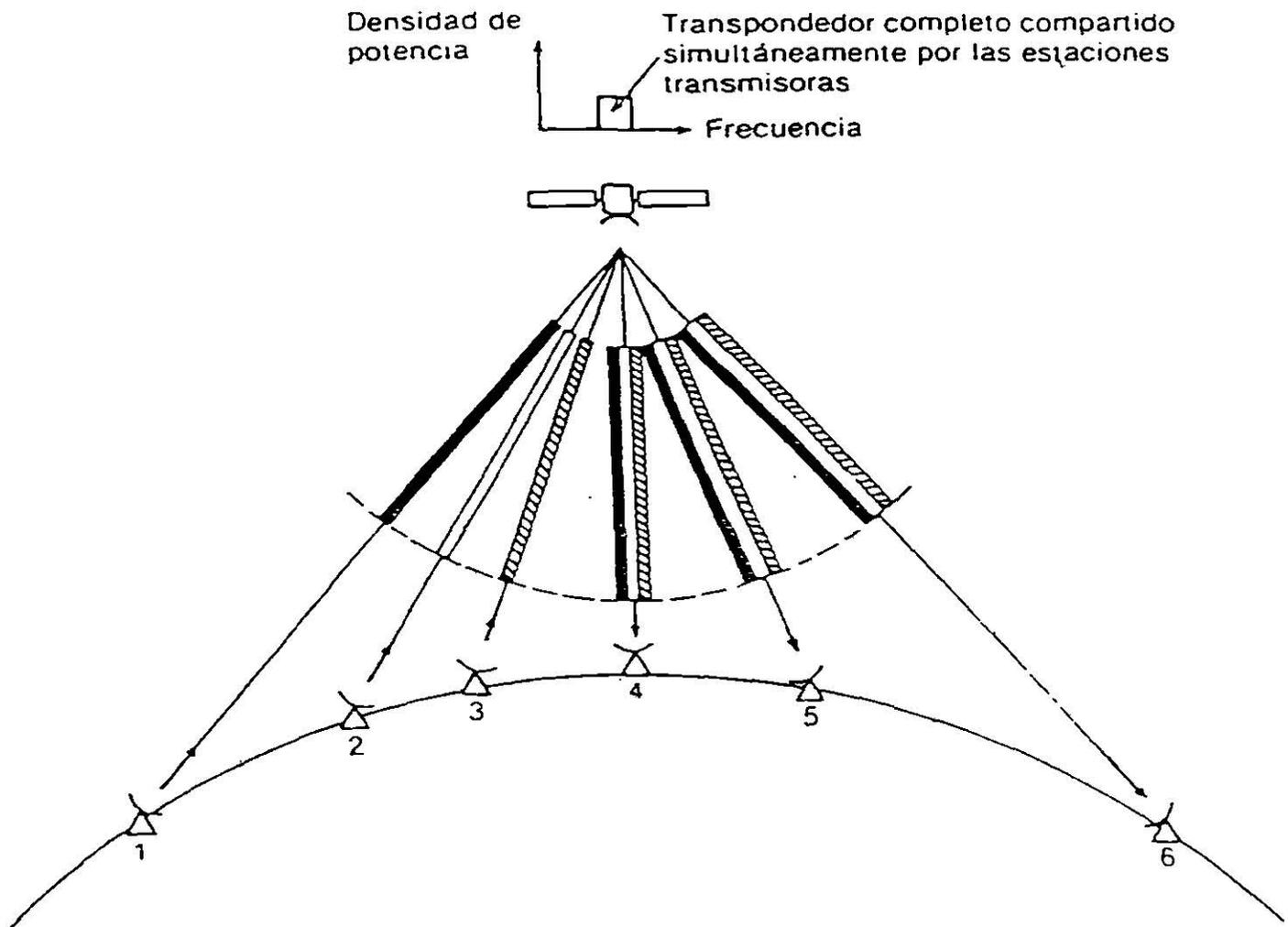


Figura 3.23 Red de seis estaciones terrenas que operan con acceso múltiple CDMA. Las estaciones transmisoras usan la misma frecuencia y transmiten al mismo tiempo; las receptoras deben conocer el código de transmisión para reconstruir el mensaje original.

FRECUENCIAS ASIGNADAS Y REUTILIZACION DE FRECUENCIAS.

La capacidad de tráfico de un satélite está limitada por dos factores: ancho de banda y potencia de los amplificadores. Por lo que respecta al ancho de banda, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) ha asignado para el servicio fijo por satélite las bandas C, X, Ku y Ka, con frecuencias centrales aproximadas de los enlaces ascendentes y descendentes de 6/4, 8/7, 14/11 y 14/12, y 30/20 Ghz, respectivamente; dependiendo de la región, hay variaciones entre los límites inferior y superior de cada una de estas bandas. Las bandas C y Ku son las que se utilizan comercialmente en la actualidad, y hasta hace poco había sólo 500 Mhz de ancho de banda asignados en cada una de ellas, por lo que la mayor parte de los satélites que las utilizan operan con esa cantidad; sin embargo, ya se han asignado otras bandas adicionales muy cercanas y el ancho de banda se ha incrementado a 1,000 Mhz. La banda X es empleada por satélites militares y gubernamentales. La banda Ka se encuentra aún en su etapa de experimentación, pero pronto se lanzarán los primeros satélites comerciales que la aprovechen, entre ellos el Italsat; esta banda tiene un ancho de banda muy atractivo de 3,500 Mhz, pero su principal desventaja es que cuando llueve los niveles de atenuación a esas frecuencias son mucho mayores que en las bandas C y Ku. En la siguiente tabla se proporciona un resumen de las frecuencias asignadas a cada una de estas bandas para que funcionen los receptores (enlace ascendente) y amplificadores transmisores (enlace descendente) de los satélites.

Con el fin de aumentar la capacidad de cada satélite se han desarrollado dos métodos para utilizar las frecuencias casi por duplicado:

La reutilización de frecuencias con aislamiento espacial se realiza con un subsistema de antenas que produzca muchos haces dirigidos hacia zonas geográficas diferentes; si algunos haces están lo suficientemente separados entre sí, entonces pueden utilizar las mismas frecuencias como se muestra en la figura.

La reutilización de frecuencias con discriminación de polarización se efectúa mediante la transmisión simultánea en un mismo haz, a la misma frecuencia, con señales de polarizaciones ortogonales; éstas pueden ser lineales (horizontal y vertical) o circulares (derecha e izquierda). Muchos satélites comerciales operan con este tipo de reutilización de frecuencias.

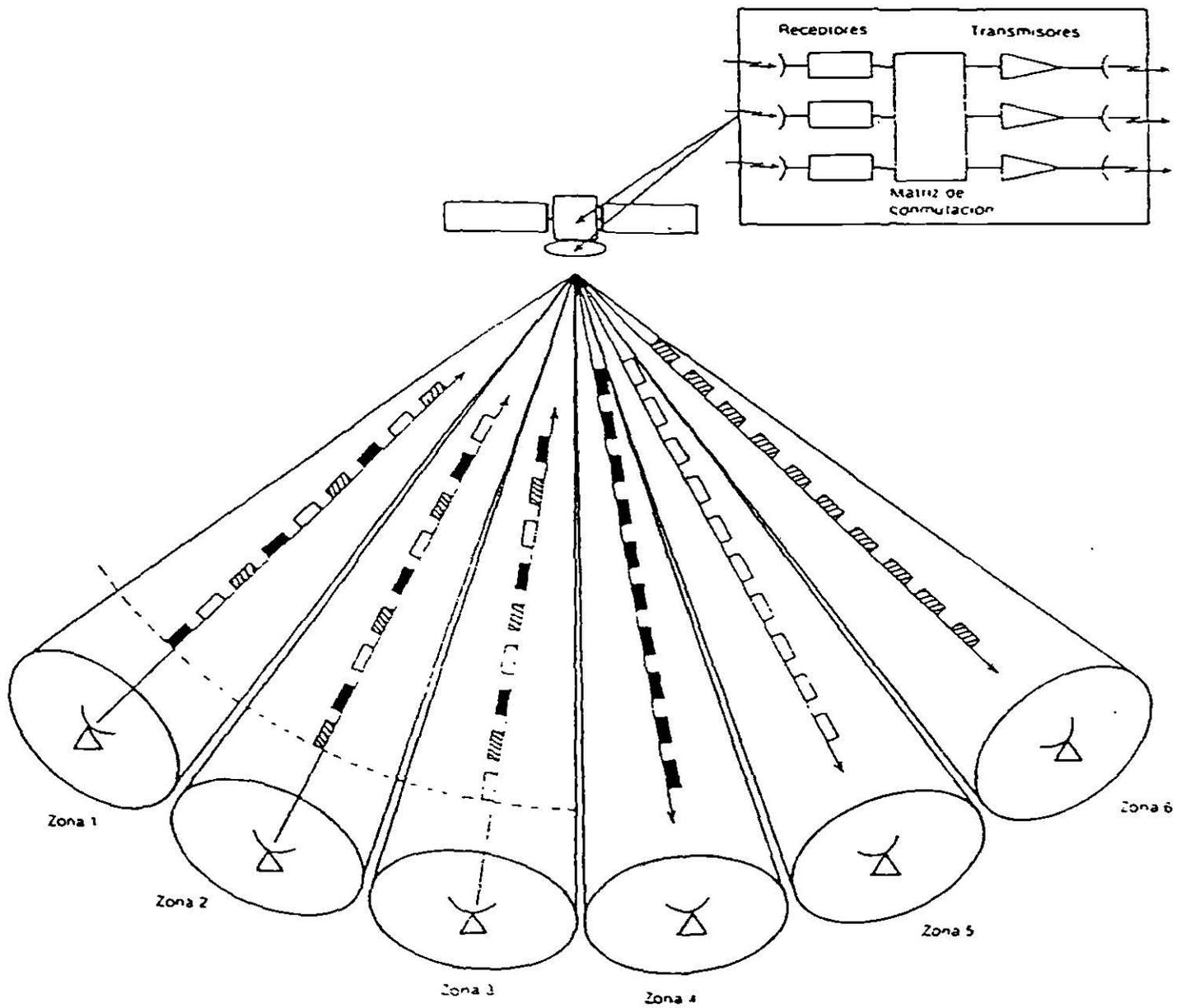


Figura 3.24 Acceso múltiple por división en el tiempo con conmutación a bordo del satélite (SS/TDMA). Cuando el número de zonas y haces aumenta, es posible utilizar las mismas frecuencias para haces de zonas no adyacentes (para evitar interferencias) y el ancho de banda disponible se aprovecha mejor varias veces; esta técnica se conoce como reutilización de frecuencia con aislamiento espacial.

Tabla 3.2 Resumen de las frecuencias asignadas a cada banda.*

Banda	Enlace ascendente (GHz)	Enlace descendente (GHz)
C: 6/4 GHz	5.925 - 6.425 (500 MHz)	3.700 - 4.200 (500 MHz)
	5.850 - 7.075 (1225 MHz)	3.400 - 4.200 4.500 - 4.800 (1100 MHz)
X: 8/7 GHz	7.925 - 8.425 (500 MHz)	7.250 - 7.750 (500 MHz)
Ku: 14/11 GHz	14.000 - 14.500 (500 MHz)	10.950 - 11.200 11.450 - 11.700 (500 MHz)
	12.750 - 13.250 14.000 - 14.500 (1000 MHz)	10.700 - 11.700 (1000 MHz)
14/12 GHz	14.000 - 14.500 (500 MHz)	11.700 - 12.200 (500 MHz)
Ka: 30/20 GHz	27.500 - 31.000 (3500 MHz)	17.700 - 21.200 (3500 MHz)

El ancho de banda se muestra entre paréntesis.

