

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA



COMUNICACION VIA SATELITE

TESINA

PARA OBTENER EL TITULO DE  
ING. EN ELECTRONICA Y COMUNICACIONES

PRESENTA

CESAR AGUILAR DELGADO

CD. UNIVERSITARIA

DICIEMBRE DE 1996

T

TK5104

A3

C.1



1080072237

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA



COMUNICACION VIA SATELITE

TESINA

PARA OBTENER EL TITULO DE  
ING. EN ELECTRONICA Y COMUNICACIONES

PRESENTA

CESAR AGUILAR DELGADO

CD. UNIVERSITARIA

DICIEMBRE DE 1996

T  
TK5104  
A3



## *Dedicatoria.*

Le doy gracias a toda la gente a la que le debo el haber concluido esta carrera, una meta en mí vida que tanto disfruto y me emociona.

Primeramente a Dios por esta vida tan bella que nos ha dado y que nos permite disfrutar al máximo los momentos cuando alguien logra alcanzar un objetivo que se había trazado. También quiero agradecer infinitamente a mis padres : Santiago Aguilar Garza (q.e.p.d.) y María Esther Delgado Ibarra vda. De Aguilar, por todo su apoyo, comprensión y sacrificios que tuvieron para conmigo, de no haber sido por todo eso y más, no hubiese alcanzado esta meta, a uds. gracias por todo; yo sé que siempre han estado conmigo en los buenos tiempos y en los otros, en los que han pasado y en los que vendrán. A la constante presencia de mi Angel, mi padre, que no falta en ningún día de mí vida. A la memoria de mi padre, a la memoria de Don Santiago Aguilar Garza, quien siempre estará conmigo. A mí madre, por su fuerza, valentía e integridad, seguro estoy que Dios le tiene un lugar reservado allá en el cielo, mamá, ¡Que Dios la bendiga siempre!

A mis hermanos, los cuales con su ejemplo han sido para mí como un aliciente que me ha ayudado a pensar que las cosas sí se pueden hacer y que no hay imposibles cuando se hacen con empeño y voluntad; a mis sobrinos, amigos, compañeros de escuela, maestros y a todas aquellas personas que de una u otra forma intervinieron en todo esto y que siempre estarán en mis pensamientos, a todos uds. les dedico esto.

*César Aguilar Delgado*

# **INDICE**

## **INTRODUCCION**

### **1.- Lanzamiento y Colocación en Orbita Geoestacionaria**

<b>1.1- El Cinturón de Clarke</b>	<b>pag. 1</b>
<b>1.2- Como llegar a la Orbita Geoestacionaria</b>	<b>pag. 2</b>
<b>1.2.1- Inyección directa en órbita geoestacionaria</b>	<b>pag. 3</b>
<b>1.2.2- Inyección inicial en órbita elíptica</b>	<b>pag. 4</b>
<b>1.2.3- Inyección inicial en órbita circular baja</b>	<b>pag. 4</b>

### **2.- El Satélite y el medio ambiente del espacio**

<b>2.1- El satélite y su nuevo hogar</b>	<b>pag. 5</b>
<b>2.2- Las fuerzas perturbadoras</b>	<b>pag. 7</b>
<b>2.3.-La temperatura del satélite</b>	<b>pag. 8</b>
<b>2.4.-Otros factores de perturbación</b>	<b>pag. 9</b>

### **3.- Estructura y funcionamiento de un satélite**

<b>3.1.- Introducción</b>	<b>pág. 10</b>
<b>3.2.- Subsistema de Antenas</b>	<b>pág. 11</b>
<b>3.3.- Subsistema de Comunicaciones</b>	<b>pág. 12</b>
<b>3.3.1.- Conceptos Generales</b>	<b>pág. 12</b>
<b>3.3.2.- Acceso múltiple por división en frecuencia</b>	<b>pág. 16</b>
<b>3.3.3.- Acceso múltiple por división en el tiempo</b>	<b>pág. 17</b>
<b>3.3.4.- Acceso múltiple por diferenciación de código</b>	<b>pág. 18</b>
<b>3.3.5.- Acceso múltiple por división en el tiempo con conmutación en el satélite</b>	<b>pág. 20</b>
<b>3.3.6.- Frecuencias asignadas y reutilización de frec.</b>	<b>pág. 21</b>
<b>3.4.- Subsistema de Energía Eléctrica</b>	<b>pág. 22</b>
<b>3.5.- Subsistema de Control Térmico</b>	<b>pág. 24</b>
<b>3.6.- Subsistema de Posición y Orientación</b>	<b>pág. 26</b>
<b>3.7.- Subsistema de Propulsión</b>	<b>pág. 27</b>
<b>3.8.- Subsistema de Rastreo, Telemetría y Comando</b>	<b>pág. 29</b>
<b>3.9.- Subsistema Estructural</b>	<b>pág. 30</b>

## **BIBLIOGRAFIA**

**pág. 31**

# ***INTRODUCCION***

Uno de los resultados más fascinantes y notables obtenidos a partir de los programas espaciales es la tecnología de los satélites artificiales. La llegada de estos aparatos electrónicos complejos ha modificado visiblemente la forma de vida de la mayor parte de la población del mundo, y quizá de toda ella aunque sea en forma indirecta.

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

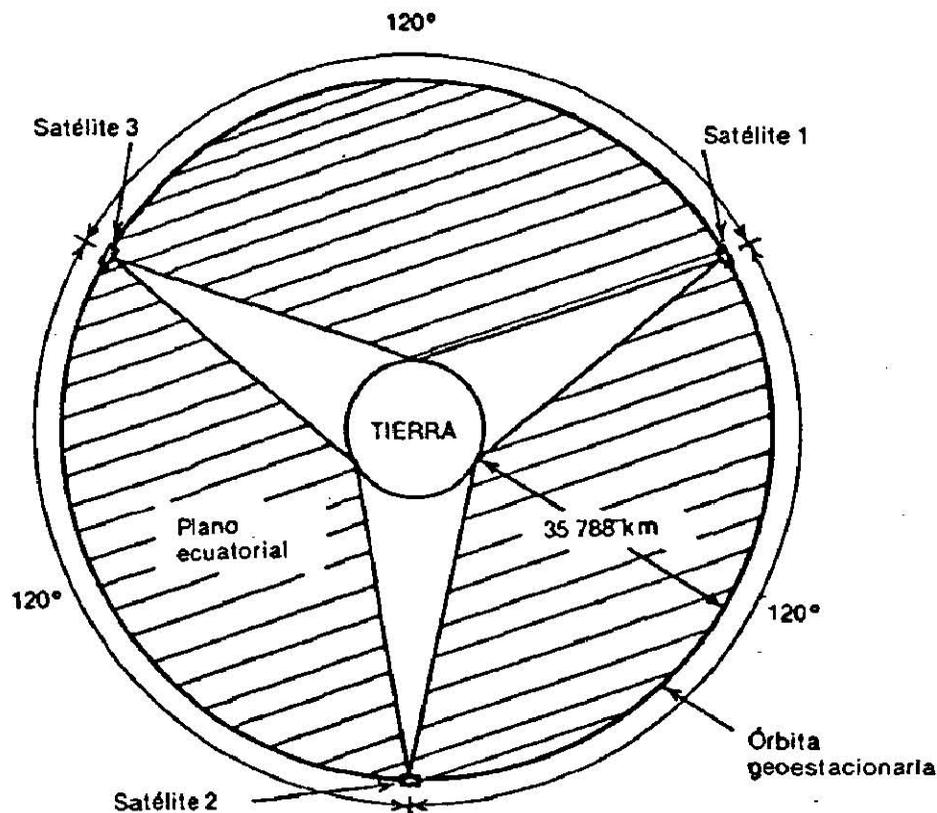
Los satélites integran una gran familia, y parte de ella la constituyen los que están abocados a los servicios de comunicaciones; dentro de estos últimos, existen algunas variantes, pero los geoestacionarios son los más importantes y los que más se utilizan en la actualidad.

## *Lanzamiento y Colocación en Órbita Geoestacionaria.*

### *1.1 El Cinturón de Clarke.*

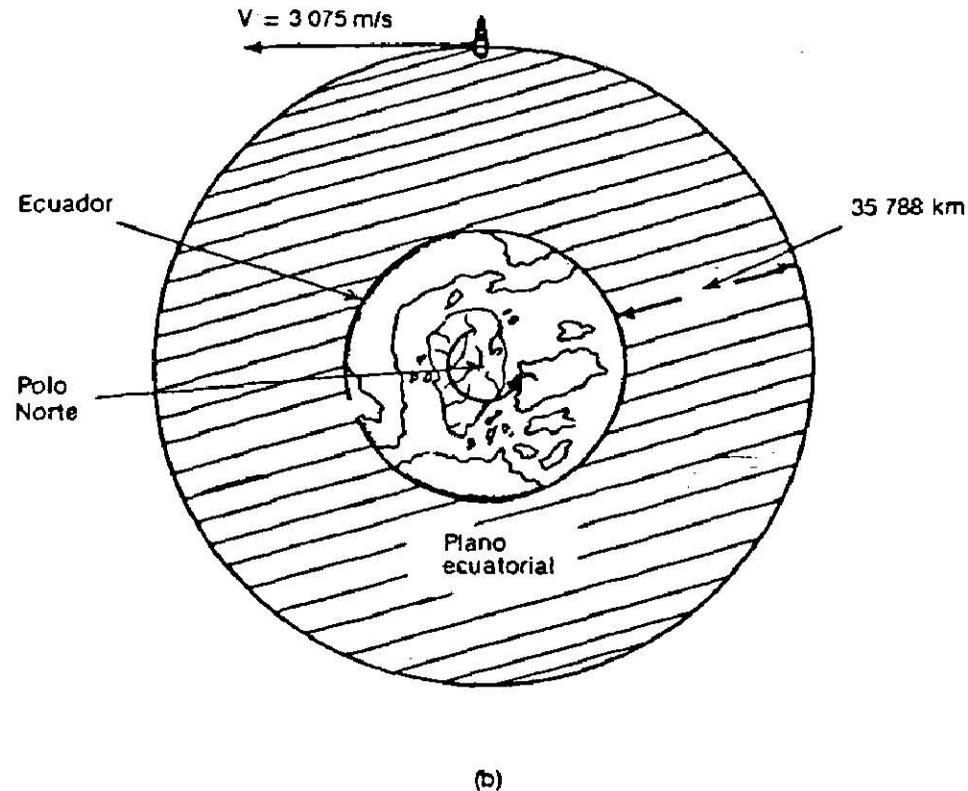
En 1945, Arthur C. Clarke sugirió la posibilidad de colocar satélites artificiales en una órbita tal que al observarlos desde un punto de vista desde la tierra parecería que no se moviesen, como si estuviesen colgados del cielo. Los satélites no cambiarían aparentemente de posición y esto traería consigo grandes ventajas, además, casi la totalidad del mundo habitado se podría intercomunicar por radio con sólo tres satélites colocados en esa órbita tan especial.

La idea de Clarke era muy buena y debían cumplirse varios requisitos para que el satélite fuese en verdad fijo con respecto a la tierra, es decir, geoestacionario. En primer lugar, el satélite debía desplazarse en el mismo sentido de rotación que la tierra, debía estar a aproximadamente a 36,000 km. de altura sobre el nivel del mar, para que no perdiese altura poco a poco y completase una vuelta cada 24 hrs., para lograr esto, el satélite debía de tener una velocidad constante de 3,075 m/s, siguiendo una órbita circular alrededor de la tierra. La era espacial, se inició, en 1957, con el lanzamiento del Spunik 1; el primer satélite geoestacionario del mundo, llamado SYNCOM.



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

La órbita en cuestión, recibe el nombre de órbita geostacionaria, pero con frecuencia muchos autores e investigadores también se refieren a ella como el Cinturón de Clarke. En la actualidad, esta es la órbita más congestionada alrededor de la tierra, la mayoría de los propietarios de satélites, desean estar ahí, por razones de sencillez y bajo costo de operación. En ella se encuentran satélites de apariencia física y aplicaciones muy diversas : militares, de comunicaciones, experimentales, metereológicos.



Los satélites geostacionarios 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.

## 1.2 Cómo llegar a la órbita Geostacionaria.

El número de tipos de órbita en los que un satélite se puede colocar es infinito, pero la más codiciada es la geostacionaria. Para llevar a un satélite a esa órbita, existen tres procedimientos distintos :

- Inyección Directa en órbita geostacionaria
- Inyección Inicial en órbita elíptica
- Inyección Inicial en órbita circular baja

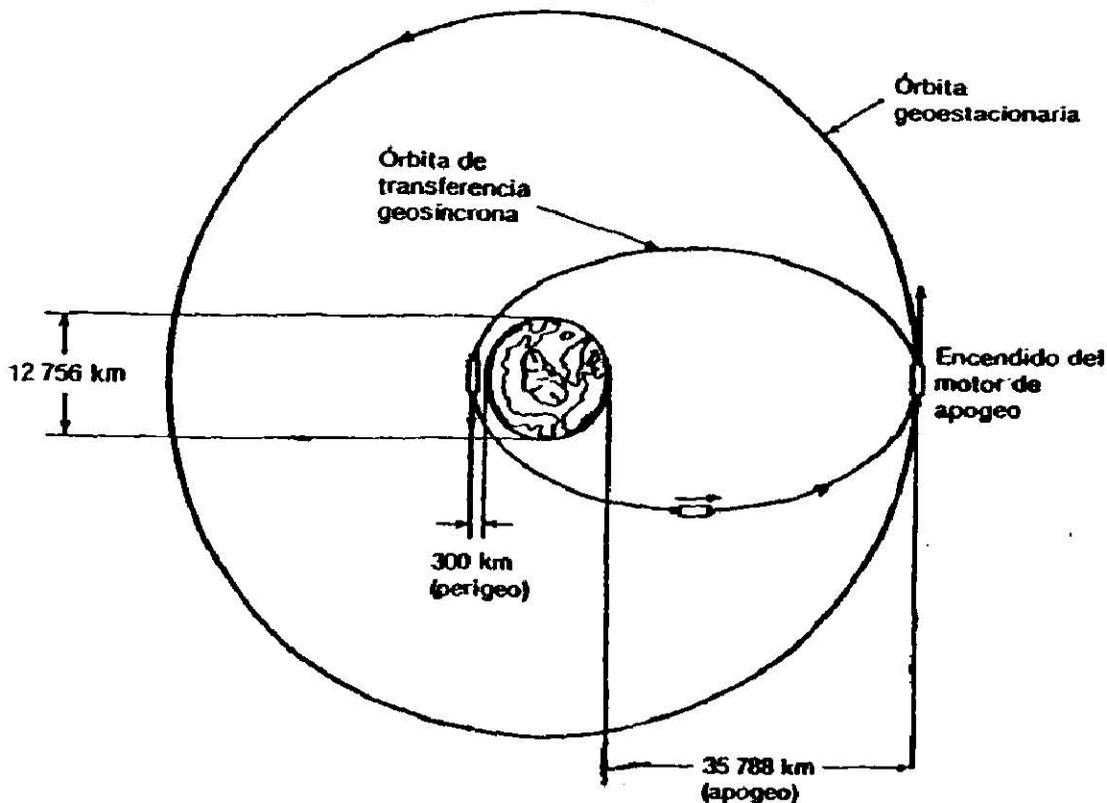
### 1.2.1 Inyección Directa en órbita geoestacionaria.

En este caso, el satélite es transportado por un cohete de varias etapas hasta el cinturón de Clarke, sin que necesite realizar esfuerzos propios, la inyección directa en órbita geoestacionaria es muy costosa y sólo se utiliza para lanzar satélites militares.

### 1.2.2 Inyección Inicial en órbita elíptica.

En este procedimiento 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 de transferencia geosíncrona, hasta que se lleva a cabo la siguiente etapa del proceso, ya con esfuerzos propios de él mismo.

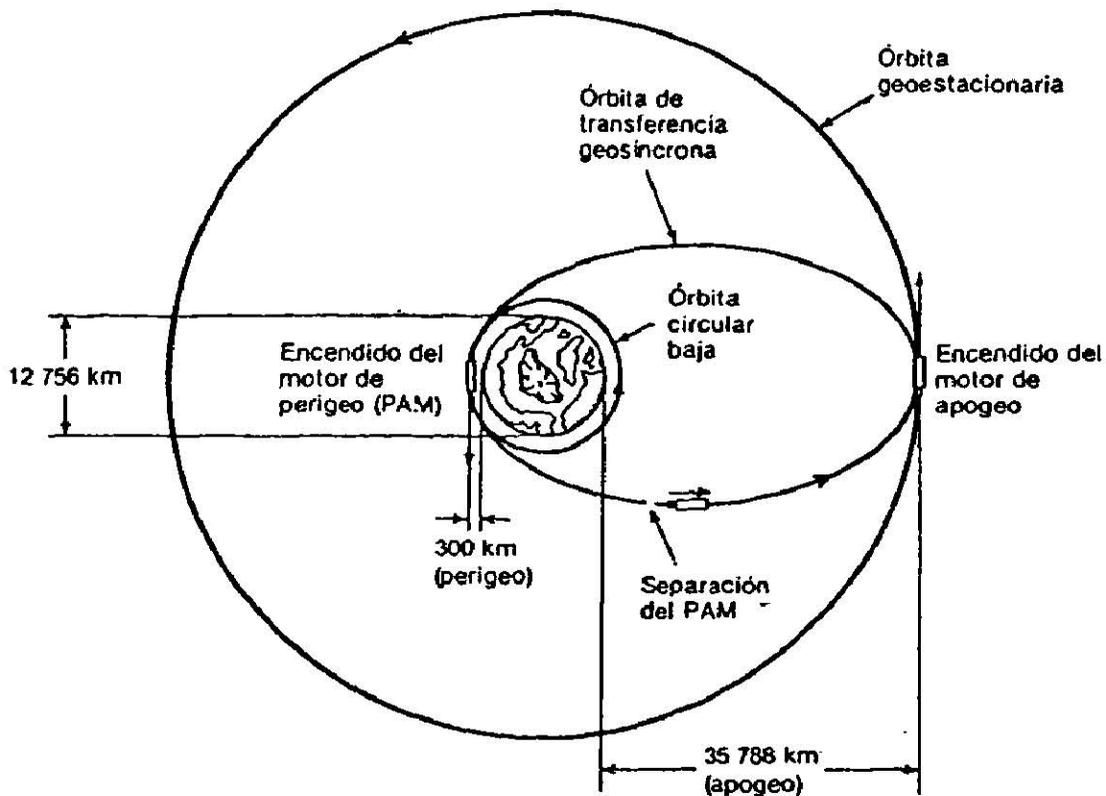
El perigeo de la órbita de transferencia geosíncrona está a una altura aproximada de 200 km. sobre el nivel del mar y su apogeo cerca de los 35,788 km., que es la altura final en la que el satélite debe quedar para funcionar. El paso siguiente es circularizar la órbita y para ello el satélite lleva acoplado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



Algunos cohetes, como los Ariane de la Agencia Espacial Europea, colocan a los satélites geoestacionarios 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 geoestacionaria.

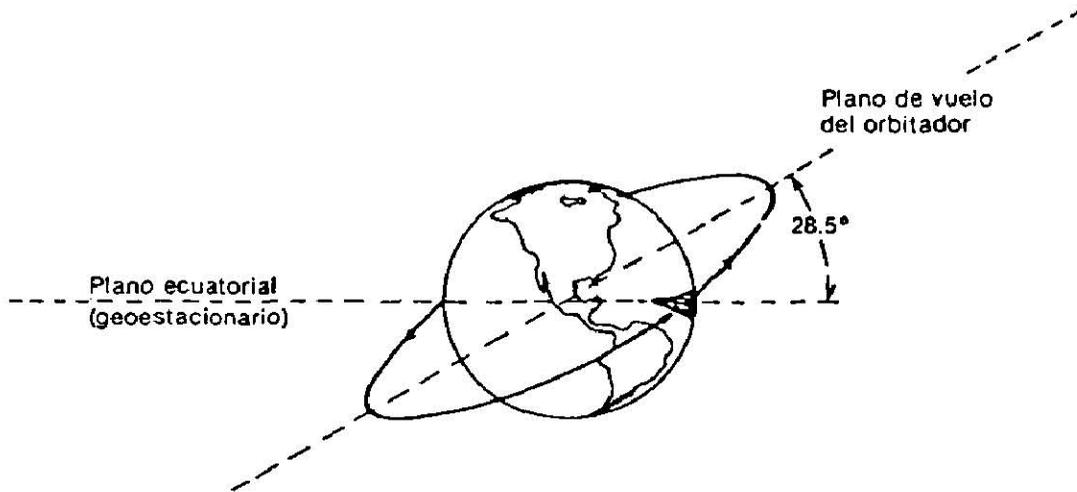
### 1.2.3 Inyección Inicial en órbita circular baja.

Esta es la técnica empleada por el Sistema de Transportación Espacial de la NASA de EE.UU., mejor conocido como orbitador, y consiste en tres pasos, los dos últimos son idénticos al caso anterior de inyección inicial en órbita elíptica, y el primer paso se describe a continuación : El orbitador despegando llevando al satélite en su compartimiento de carga y entra en órbita alrededor de la tierra siguiendo una trayectoria circular, a una altura de aprox. 300 km. sobre el nivel del mar. En una de las muchas vueltas que da la nave, el satélite es liberado y arrojado del compartimiento de carga, quedando de esta forma en órbita circular baja alrededor de la tierra, el satélite lleva consigo un motor de perigeo, el cual se enciende cuando cruza el ecuador, el cual le da un empuje que modifica su órbita, cambiándola de circular baja o de estacionamiento a una elíptica, una vez que ha cumplido su función, el motor de perigeo se desprende del resto del cuerpo del satélite, dando así las condiciones 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. A la órbita de transferencia geosíncrona, también se le llama órbita de transferencia de Hohmann.



Los orbitadores de la NASA colocan al satélite en una órbita circular baja. Para que éste llegue a su posición geostacionaria 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.

La órbita elíptica de transferencia está, sobre un plano inclinado  $28.5^\circ$  con respecto al plano ecuatorial, el ángulo formado entre el plano ecuatorial y el plano de la órbita elíptica depende de la latitud geográfica del centro del centro de lanzamiento utilizado.



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  $28.5^\circ$  con respecto al plano ecuatorial. Se encuentra ahora en órbita circular baja.

## *El satélite y el medio ambiente del espacio.*

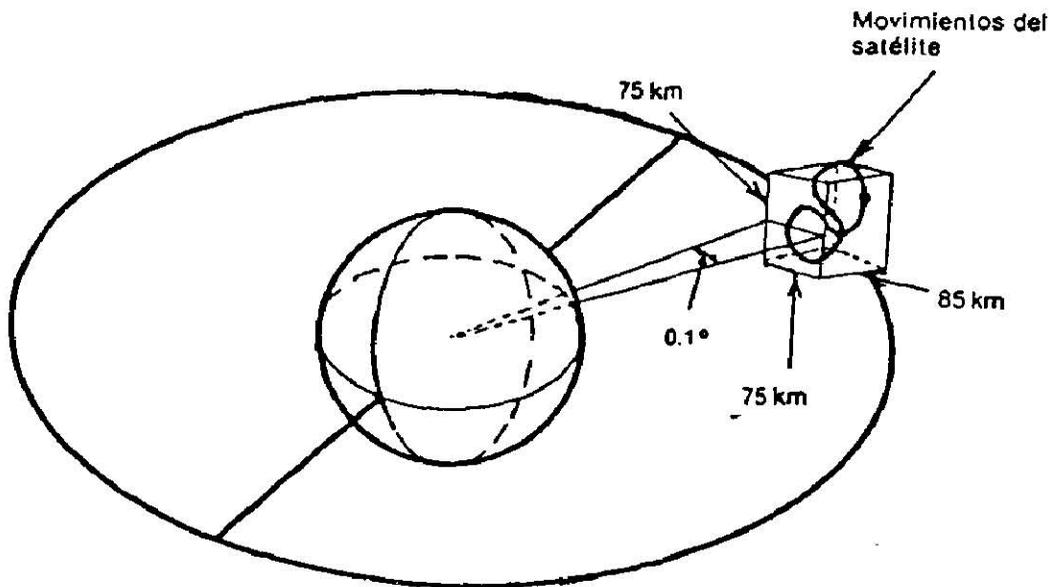
### *2.1 El satélite y su nuevo hogar.*

El satélite ha llegado a su posición final en el cinturón de Clarke, sin embargo, no es el primero en llegar ahí; hay otros satélites en el mismo cinturón, de configuraciones, tamaños y aplicaciones distintas; muchos de ellos reciben y transmiten señales en las mismas frecuencias que el satélite recién llegado usará durante su funcionamiento, por muchos años. Los satélites se encuentran separados entre sí por dos o tres grados de arco, equivalentes a 1,500 o 2,200 kms. respectivamente, con lo cual se garantiza que no exista ningún riesgo de interferencia radioeléctrica entre ellos. De cualquier forma, hay ciertas secciones del cinturón de Clarke que son más codiciadas que otras y que por lo tanto se encuentran sumamente pobladas. La zona de mayor tráfico internacional de señales radioeléctricas vía satélite es la del océano Atlántico, debido a que a sus lados se encuentran los países industrializados de América del Norte y Europa. Por lo que se refiere a tráfico interno o doméstico de señales, se intuye que una de las zonas más congestionadas, por la gran demanda de servicios que allí hay, tanto en variedad como en cantidad, es la sección del arco ecuatorial comprendida por las longitudes geográficas de México, EE.UU. y Canadá, así como las longitudes más cercanas a sus territorios.

El satélite recién llegado, no debe causar problemas de interferencia ni degradaciones en la calidad de las señales recibidas o transmitidas por él, y por lo tanto debe permanecer ahí lo más fijo que se pueda. Es decir, aún cuando se esté moviendo a gran velocidad alrededor de la tierra para mantener su posición geoestacionaria, no debe desviarse de su trayectoria y tampoco debe cambiar la orientación de su cuerpo con respecto a la superficie terrestre.

Varias fuerzas se encargan de dificultarle la tarea al satélite, empujándolo o tirando de él de un lado a otro, por lo que se le puede imaginar, aunque sea muy exagerada, como una botella que flota sobre las olas del mar cambiando su orientación y posición muy constantemente. A través del subsistema de propulsión del satélite, es posible ayudarlo a corregir su orientación y posición, enviándole comandos a control remoto en forma periódica.

En la figura siguiente, se muestran las dimensiones de una gigantesca caja imaginaria en cuyo centro estaría colocado el satélite en el espacio; notése que cada lado de la caja mide muchos kms. mientras el satélite se mueva dentro de ella, no habrá ningún problema, pero hay que rastrearlo permanentemente para observar su posición y encender el subsistema de propulsión a control remoto, antes de que se salga, para así regresarlo hacia el otro lado de la caja. Para realizar todas estas maniobras con precisión se necesita contar en tierra con un centro de control espacial computarizado y que el satélite le envíe cierto tipo de información, que le permite a los operadores, y a las computadoras, hacer sus cálculos y tomar las decisiones correctas.



**Siempre y cuando el satélite no se salga de esta gran caja imaginaria no hay ningún problema.**

Cada vez que el subsistema de propulsión se activa para corregir la posición y orientación del satélite se consume combustible, y poco a poco los tanques de almacenamiento se van vaciando. ¿Que ocurre cuando ya no hay combustible en los

tanques de almacenamiento, después de varios años de haber realizado gran número de maniobras correctivas? Simplemente ya no es posible mantener al satélite dentro de la caja imaginaria, y tampoco orientarlo correctamente hacia la superficie de la tierra a la que le debe de dar servicio; se corre el grave riesgo de causarle interferencia a otros sistemas, además de otros problemas operativos en tierra, y la única solución es apagar el satélite, concediéndole su jubilación. El número de años que puede trabajar sin problemas es decir, su **vida útil**, depende en gran medida de la eficiencia con la que los operadores en tierra administren el combustible contenido en los tanques de almacenamiento del satélite.

## ***2.2 Las Fuerzas perturbadoras.***

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 una gran esfera en cuyo centro esté el centro de la tierra, y si se 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 en el sur del océano Pacífico que sobre un punto en el 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, y además su masa tendría que estar mezclada homogéneamente; ambas cosas son, por supuesto imposibles, dada la forma en que se formó y a que gira sobre su propio eje.

El campo gravitacional de la tierra es la fuerza de mayor influencia sobre la posición y orientación 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 del satélite que éste de la superficie del planeta, su efecto comparativo es mínimo, al igual que en el caso de la fuerza gravitacional perturbadora del Sol. Otra fuerza que también produce cambios en la posición y orientación del satélite es la presión de la radiación solar sobre la superficie de su estructura; el principal efecto de esta fuerza es cambiar la excentricidad de la órbita del satélite, y como la resultante no incide precisamente sobre su centro de masa, al mismo tiempo se produce un giro, que cambia su orientación con respecto a la superficie del planeta. El campo magnético de la tierra también produce un par o fuerza perturbadora sobre el satélite, pero su efecto es despreciable. Existen, además, otras cuya aparición y efecto son impredecibles, producidas por el impacto de 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.

La posición y orientación del satélite no son modificadas solamente por las fuerzas externas, sino que el propio satélite también genera otras fuerzas perturbadoras. El simple hecho de que haya movimiento en sus antenas, sus arreglos solares o el combustible que quede dentro de sus tanques de almacenamiento, produce pares o fuerzas que afectan al satélite. Conforme los tanques de almacenamiento se van vaciando, el centro de masa del satélite cambia; por lo tanto, cuando se activa el subsistema de propulsión para corregir errores en orientación y posición, el empuje resultante no se aplica precisamente sobre el centro de masa; esto produce pares o fuerzas perturbadoras durante la realización de las correcciones.

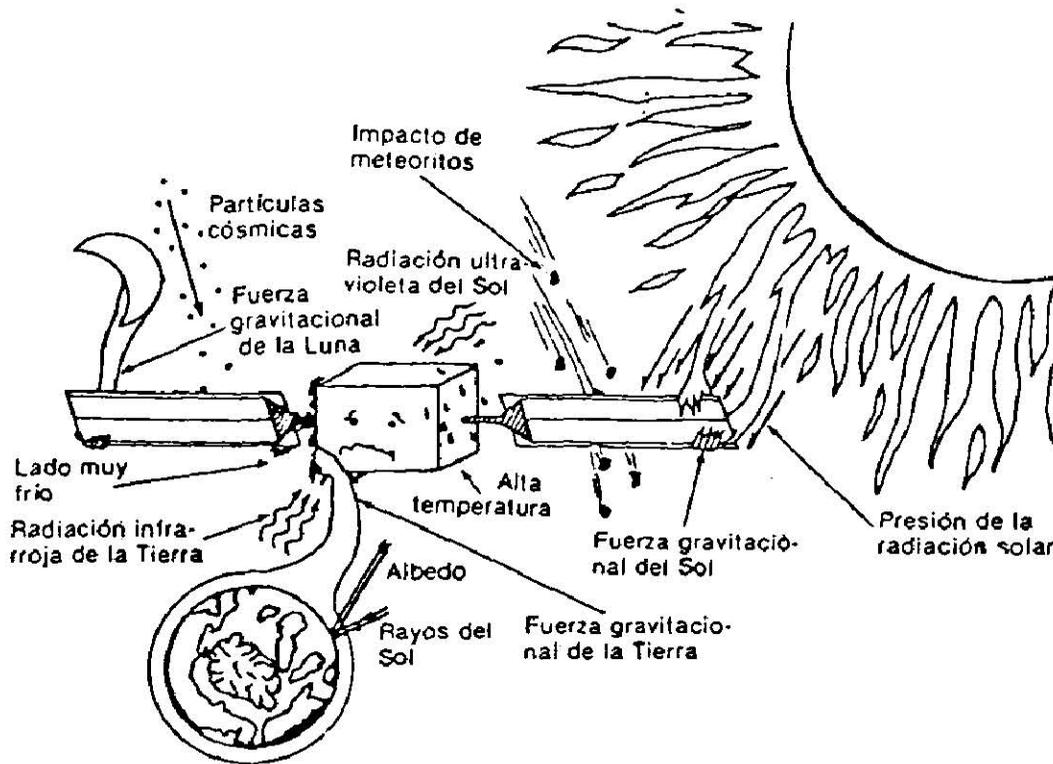
Por último, la misma radiación radioeléctrica de las antenas del satélite produce una presión, cuyo efecto es importante cuando la potencia de transmisión del satélite es alta y está concentrada en un haz de iluminación muy angosto. Esta fuerza origina un giro del satélite, y para reducir al máximo su 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. Otros efectos que también pueden alterar el correcto funcionamiento del satélite como son: la radiación solar, las partículas cósmicas y los eclipses.

### ***2.3 La temperatura del satélite.***

El satélite está integrado por gran número de elementos, todos ellos fabricados con distintos materiales y diseñados para realizar funciones diversas. Por ejemplo, las celdas solares trabajan con mucha mayor eficiencia entre  $-100\text{ C}$  y  $+50\text{ C}$ , las baterías solamente entre  $0\text{ C}$  y  $+20\text{ C}$ , y los tanques de combustible deben estar entre  $+10\text{ C}$  y  $+50\text{ C}$ ; el equipo electrónico y los sensores infrarrojos, entre otros componentes, también requieren rangos específicos de temperatura para funcionar bien. Por lo tanto, es preciso garantizar un control térmico eficaz en la estructura del satélite y en cada uno de sus equipos para que no falle.

La principal fuente de radiación 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; por supuesto, sin él tampoco habría vida sobre la superficie de la Tierra y muchos menos satélites artificiales girando alrededor de ella. Por un lado, 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 la cara que está orientada hacia el sol se calienta mucho, las partes no iluminadas se enfrían. En el interior del satélite, la transferencia de calor se lleva a cabo por conducción, y en el espacio por radiación, puesto que el medio ambiente de casi vacío excluye la posibilidad de que en este último se pueda transferir por convección. En cuanto a la contribución térmica de la Tierra, ésta consiste en radiación infrarroja emitida por ella misma y de la reflexión de los rayos solares sobre su superficie, denominada albedo; el efecto térmico de su radiación es despreciable en comparación con el producido por la radiación solar directa.

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, y gracias a ellas el servicio no se interrumpe durante un eclipse o la noche terrestre.



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

## 2.4 Otros Factores de Perturbación.

La radiación ultravioleta del Sol causa que los materiales del satélite se ionicen; esto produce un aumento en la conductividad de los aisladores y 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 cortocircuito en materiales aislantes. Como punto a su favor, el medio ambiente de casi vacío tiene la ventaja de que elimina la posibilidad de que haya problemas por corrosión. Las partículas cósmicas que inciden sobre el satélite hacen que sus plásticos se ionicen y que la eficiencia de sus celdas solares se degraden aún más; por si fuera poco, también pueden modificar el acabado de las superficies diseñadas para controlar su balance térmico.

## *Estructura y Funcionamiento de un Satélite.*

### *3.1 Introducción.*

Un satélite es un sistema muy complejo y delicado, integrado por varios subsistemas; cada uno de ellos es igualmente importante, pues su probable falla podría causar la inutilidad parcial o total del conjunto. El satélite necesita energía eléctrica, disipar calor, corregir sus movimientos y mantenerse en equilibrio, ser capaz de regular su temperatura, ser resistente al medio ambiente en el que vive, y desde luego poder comunicarse con la Tierra, sus subsistemas más importantes se indican en la siguiente tabla:

	<i>Subsistema</i>	<i>Función</i>
1	Antenas	Recibir y transmitir señales de radiofrecuencia.
2	Comunicaciones	Amplificar las señales y cambiar su frecuencia.
3	Energía Eléctrica	Suministrar electricidad con los niveles adecuados de voltaje y corriente.
4	Control Térmico	Regular la temperatura del conjunto.
5	Posición y Orientación	Determinar la posición y orientación del satélite.
6	Propulsión	proporcionar incrementos de velocidad y pares para corregir la posición y la orientación.
7	Rastreo, telemetría y comando	Intercambiar información con el centro de control en Tierra para conservar el funcionamiento del satélite.
8	Estructural	Alojar todos los equipos y darle rigidez al conjunto

### **3.2. Subsistema de Antenas.**

Las antenas reciben las señales de radiofrecuencia provenientes de las estaciones terrenas transmisoras, y después 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 diferentes. Los elementos de alimentación, denominados alimentadores son generalmente antenas de corneta conectadas a guías de onda que emiten energía hacia un reflector parabólico, o bien la captan proveniente de este último para entregársela a los equipos receptores.

Las antenas son el puerto de entrada y 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. Las hay de distintos tamaños, configuraciones y acabados, según las frecuencias a las que tengan que trabajar y la cobertura que deban tener de ciertas zonas geográficas de la tierra.

La **dimensión eléctrica** de una antena es igual a su dimensión física dividida entre lo que mide la longitud de onda de la frecuencia de operación, o sea, es el número de longitudes de onda que cabrían alineadas en su apertura o boca. Hay satélites que tienen varias antenas de características distintas, con finalidades diferentes. las antenas de cobertura puntual, reciben este nombre porque concentran su potencia casi en un punto, en relación con las dimensiones del planeta, los haces de iluminación de estas antenas, por ser tan angostos, reciben el nombre de **haces pincel o puntuales**; a la cobertura de cada haz, se le llama **huella de iluminación** que es la intersección del haz radiado por la antena con la superficie de la tierra. y a cada haz que irradia la antena también se le llama **haz de contorno**, independientemente de la extensión territorial que abarque. Otra antena que nada tiene que ver con la recepción y la transmisión de señales de comunicaciones, es la antena de telemetría y comando, encargada de recibir las señales que contienen órdenes emitidas por el centro de control en la tierra, para que se efectúe alguna corrección a bordo; es responsable de enviarle al centro de control sobre el estado de operación de todo el satélite, con el fin de que en la tierra se pueda saber qué ocurre en su interior, dónde está y como está funcionando en general, de esta manera sus propietarios u operadores pueden realizar las modificaciones necesarias enviando las señales de comando que, como ya se dijo, son recibidas por la misma antena.

La antena de telemetría y comando no es parabólica ni de corneta, pues estas últimas 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, aún cuando el satélite cambie bruscamente de orientación, su comunicación con el centro de control no se interrumpe y se sigue teniendo control sobre el mismo.

### ***3.3 Subsistema de Comunicaciones.***

#### ***3.3.1 Conceptos Generales.***

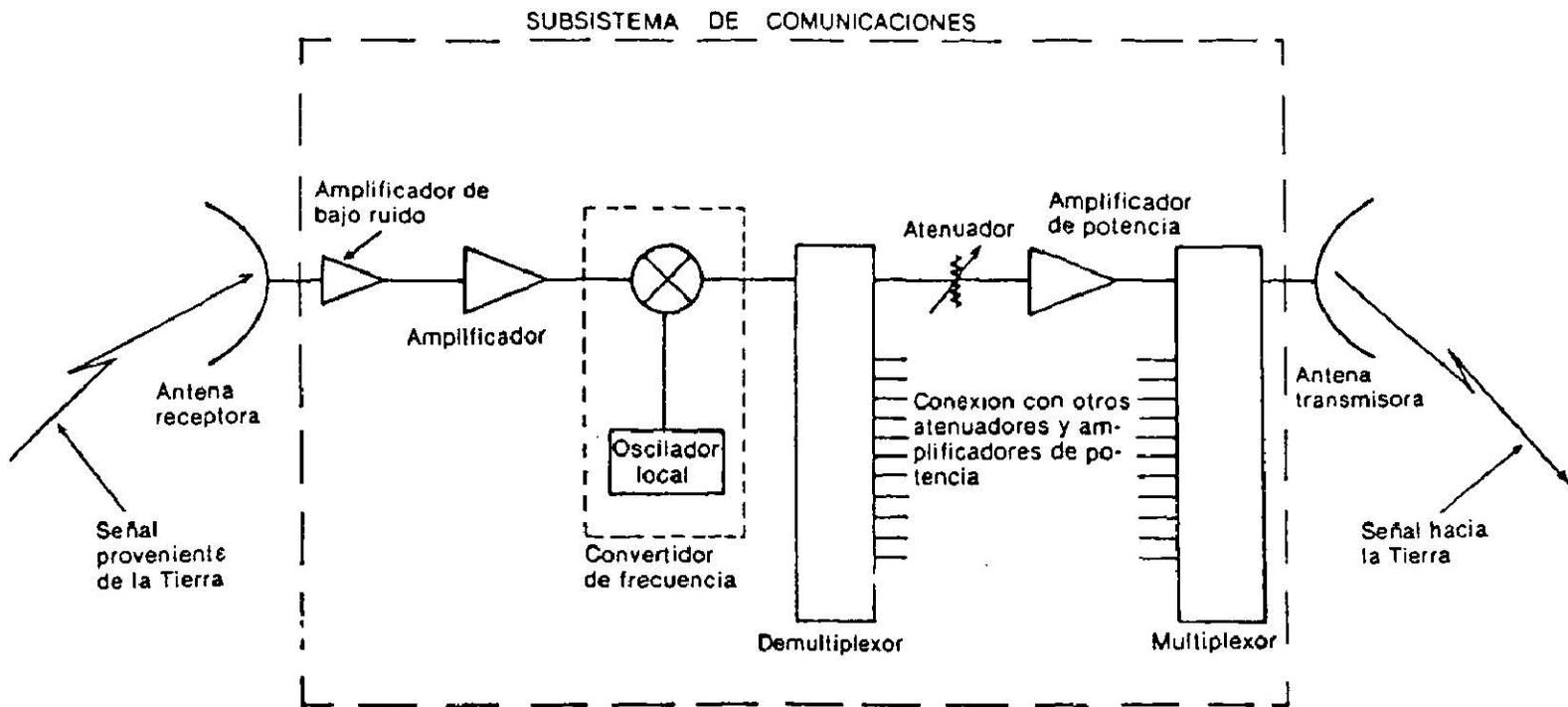
Las señales de comunicaciones (telefonía, televisión e información digital) recibidas por el satélite entran a él a través de sus antenas, y ellas mismas se encargan de retransmitir toda esa información hacia la tierra, después de procesarla debidamente. Los principales pasos del proceso son amplificar 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, multiplexores, amplificadores, convertidores de frecuencia y conmutadores. A la trayectoria completa de cada repetidor, 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, o sea que el subsistema de comunicaciones consta de muchos transpondedores, y su número depende del diseño del satélite.

La señal proveniente de la Tierra que entra por la antena receptora puede contener muchos miles de canales telefónicos, muchos canales de televisión, o de datos, todos ellos enviados a través de frecuencias diferentes; al rango de frecuencias que hay entre la frecuencia más baja y la más alta, se le da el nombre de ancho de banda. Cuanto mayor sea el ancho de banda de un equipo, éste será más capaz de trabajar de igual forma dentro de un mayor rango de frecuencias.

Un satélite puede tener varias antenas receptoras o quizá solamente una, dependiendo de su diseño y aplicaciones, y cada una de ellas debe ser capaz de recibir al mismo tiempo muchos canales con información, que posteriormente serán amplificados por separado en distintos transpondedores. Las antenas receptoras tienen un ancho de banda muy grande, las cuales operan a las frecuencias asignadas para los satélites de comunicaciones, cuya mayor parte funciona actualmente en las frecuencias C y Ku. Existen satélites denominados híbridos, que tienen los equipos necesarios para trabajar simultáneamente tanto en la banda C, como en la Ku, con lo cual se duplica la capacidad en el número de canales que puede manejar el sistema 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, pues su ancho de banda de recepción es igual o mayor a 500 MHz, con una frecuencia central de 6.175 Ghz. Los transpondedores cambian todas las frecuencias de todas las señales contenidas dentro en ese rango, bajándolas a otra de igual ancho de banda, pero cuyos límites inferior y superior son, respectivamente, 3.7 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. Un enlace de este tipo se representa con la nomenclatura de 6/4 Ghz, indicando que la señal sube al satélite con frecuencias cercanas a los 6 GHz y que baja con frecuencias cercanas a los 4 GHz. En la

banda Ku, el proceso de recepción, transmisión y conversión de frecuencias es similar al de la banda C, sólo que las frecuencias tierra-satélite están entre 14.9 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; el enlace se representa con la nomenclatura 14/12 Ghz.



Relación entre los subsistemas de antenas y comunicaciones.

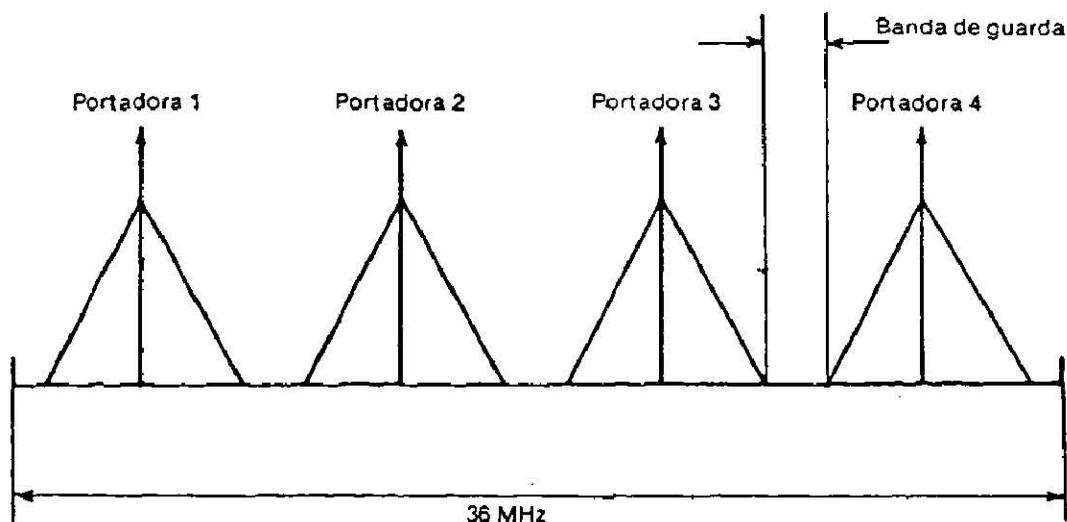
El primer dispositivo electrónico importante que encuentran las señales recibidas por la antena es un **amplificador de bajo ruido**, con poca potencia de salida; este aparato genera internamente muy poco ruido, que se suma a las señales originales que entran a él para amplificación. Todos los dispositivos electrónicos generan ruido, principalmente por calentamiento. La primera etapa de amplificación es muy importante, porque cualquier señal recibida por la antena es muy débil; después de haber recorrido 36,000 km., procedente de la tierra. Por esta razón, es muy importante que el ruido generado por este primer dispositivo de amplificación común sea lo más bajo posible, y de ninguna manera comparable en magnitud a ninguna de las débiles señales que están entrando en él. Las estaciones terrenas receptoras también llevan un amplificador de bajo ruido inmediatamente después de la antena, por razones similares, ya que las señales también se atenúan mucho durante se recorrido de regreso del satélite a la Tierra.

El **amplificador de bajo ruido** tiene un ancho de banda muy grande, de 500 Mhz, pues debe 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 el subsistema de comunicaciones. El amplificador de bajo ruido es un equipo redundante, de tal forma que si uno de los amplificadores se descompone, mediante un conmutador se transfiere el enlace a el otro que sí esté en buenas condiciones. Después de que todas las señales han sido amplificadas, continuarán su viaje a lo largo de la trayectoria del transpondedor; en las etapas siguientes de amplificación se les seguirá introduciendo un poco más de ruido.

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. Después de amplificar y cambiar la frecuencia de las señales, el siguiente paso es separarlas en grupos o bloques; la separación se realiza con un **demultiplexor**, que tiene un solo conducto de entrada y varios de salida. A él 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.

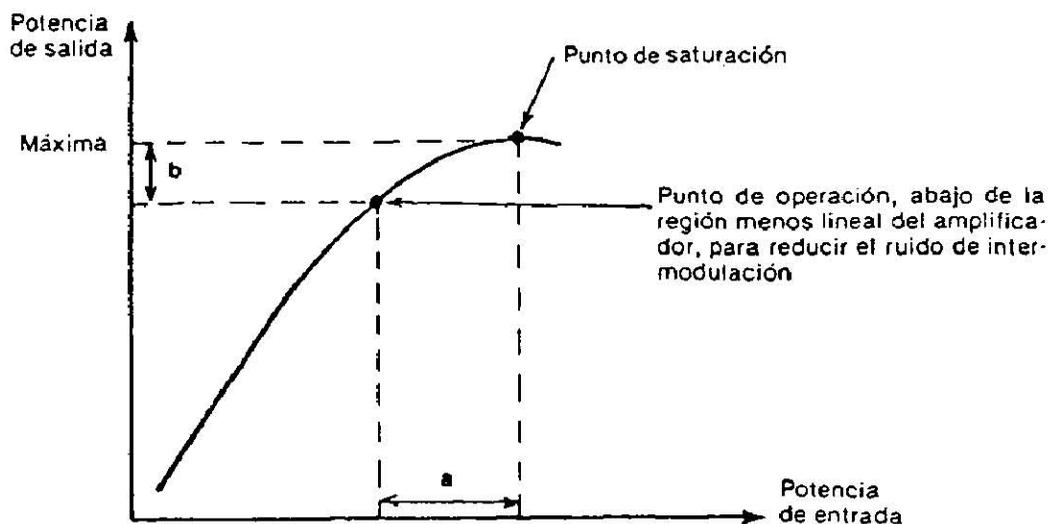
A la salida del demodulador hay un atenuador o resistencia variable; está sirve para disminuir a control remoto, y en distinto grado, la intensidad del bloque de señales que entra a cada amplificador de potencia, o a la primera etapa de amplificación si es que hay más de una. La regulación de la intensidad de la entrada permite operar al amplificador de potencia en distintas condiciones o puntos de trabajo, es decir, se puede controlar la cantidad de potencia que salga de él.



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.

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. La misma técnica se utiliza cuando los canales telefónicos no se agrupan, sino que se envían en forma aislada, uno en uno; en este caso, cada canal telefónico tiene asignada una frecuencia portadora distinta. 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 figura anterior se muestra un ejemplo usual 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.

Se le denomina **ruido de intermodulación**, a todas las señales indeseables que se producen internamente y se suman en la salida a la información original, distorsionándola. Por eso 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 se tenga que sacrificar potencia de salida.



Curva característica a lineal de entrada-salida de un amplificador de potencia; a es la reducción necesaria de la potencia de entrada respecto al valor que satura al amplificador, para poder trabajar en el punto de operación, y b es la reducción que se obtiene en la potencia de salida respecto a la potencia máxima que se obtendría en saturación.

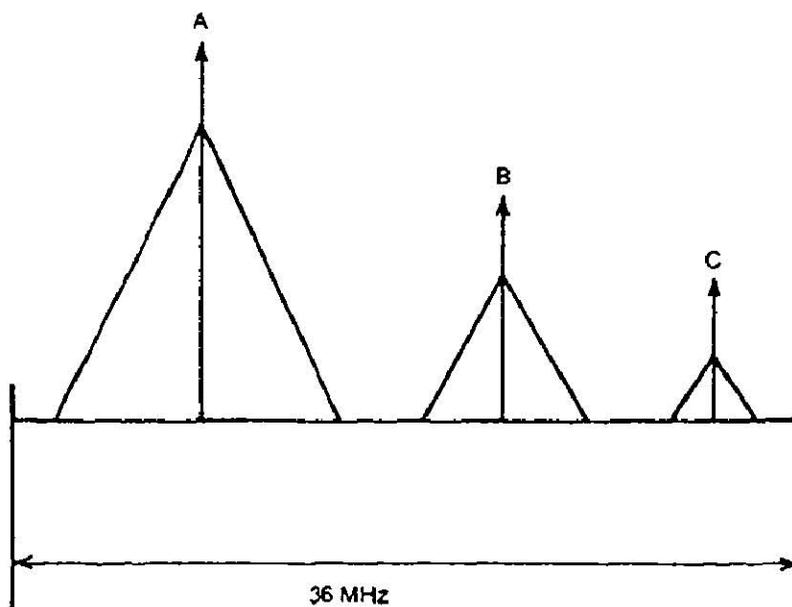
Se pueden diferenciar tres tipos de enlaces : punto-punto, punto-multipunto, y multipunto-punto. El primero uno solo a dos puntos geográficos, por ejemplo, cuando se tiene una conversación telefónica, en cuyo caso el enlace es bidireccional. El segundo corresponde a un sistema de difusión o distribución de información, en donde la señal es generada en un solo punto, por ejemplo, en un estudio de televisión, en una cabina de radio o en un centro de cómputo, y se desea que sea recibida en muchos otros puntos, sin necesidad de que éstos respondan, o sea que el enlace es unidireccional, en forma de

estrella. El tercero es el caso inverso al anterior, donde en vez de diseminar una información en muchos puntos, se desea concentrarla o recolectarla de éstos en un solo punto específico; por ejemplo: podrían tenerse muchas estaciones terrenas transmisoras en todas las plantas generadoras de energía eléctrica de un país, que transmitiesen la información más importante sobre su estado de operación a una gran central de control de energía, ubicada en un punto clave, que utilizaría la información proveniente de todas las plantas para analizar y controlar mejor la generación y distribución de la energía eléctrica dentro de su territorio, enviando órdenes y comandos a cada planta generadora según fuese necesario.

Para que no ocurra ningún tipo de conflicto entre las señales que llegan simultáneamente al satélite, se establece una orden mediante una técnica de **acceso múltiple**, de la cual hay tres tipos: por división de frecuencia, por división en el tiempo, y por diferenciación de código; de estos, el primero es el más común en la actualidad.

### ***3.3.2 Acceso Múltiple por división en frecuencia.***

Se presenta este tipo de acceso, cuando se tengan dos o más estaciones que deseen transmitir su información al mismo tiempo, y que entre todas, se tenga un ancho de banda total cercano a los 36 Mhz, entonces ellas ocuparán simultáneamente el mismo transpondedor del satélite, separadas por bandas de guarda, como se ilustra en la figura de abajo, pero con frecuencias portadoras diferentes cada una, ya que el espectro radioeléctrico del transpondedor se divide en secciones o ranuras de frecuencias asignadas a cada una de ellas. A este tipo de acceso, también se le llama **acceso múltiple por división en frecuencia con asignación fija**.



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.

Otra alternativa del acceso múltiple por división en frecuencia, se le denomina acceso múltiple por división en frecuencia con **asignación por demanda o DAMA**. La técnica de acceso múltiple DAMA permite aprovechar al máximo las ranuras de frecuencia y la potencia del satélite cuando el tráfico que genera cada estación es esporádico, pues las ranuras se asignan a las estaciones terrenas solamente durante el tiempo que las necesiten para establecer comunicación; en el momento en el que alguna deja de transmitir, esa ranura se libera y queda disponible para cualquier otra de las estaciones del sistema que la solicite temporalmente. Cuando minutos u horas después, la estación terrena que liberó una ranura quiera transmitir más información, podría darse el caso de que la ranura de frecuencia que utilizó previamente dentro del amplificador esté ocupada en ese instante por la señal de otra estación; pero puede haber otras ranuras vacías en ese momento, y de ser éste el caso, la estación terrena en cuestión podría utilizar cualquiera de ellas. Es decir, la frecuencia de la portadora transmitida por cada estación terrena cambia en el tiempo, moviéndose de lugar en el espectro radioeléctrico del amplificador y, por supuesto, la estación debe estar debidamente equipada para hacerlo.

Desde luego que la ocupación de cualquier ranura vacía no se puede hacer en forma arbitraria, sino a través de una estación central que coordina el banco de frecuencias disponibles. Cada vez que una estación terrena desee iniciar una transmisión, debe solicitarle antes al banco de frecuencias que le asigne una de ellas para su portadora; este mismo banco de frecuencias se comunica con el punto de destino para informarle que se le va a transmitir y en qué frecuencia debe sintonizarse para que reciba la señal; solamente hasta que la estación transmisora y la receptora hayan recibido la asignación de sus frecuencias de operación, se puede iniciar el enlace.

Una forma de transmisión se le denomina **SCPC o canal único por portadora**, en el cual cada ranura tiene su propia frecuencia portadora y su ancho de banda es ocupado por un solo canal telefónico modulado, este canal telefónico no necesariamente debe conducir telefonía analógica, sino que puede contener un canal telefónico digitalizado o un canal de datos de baja velocidad transmitido con modulación digital, de la cual hay varias opciones utilizadas a la vez en la práctica. Para enlazar puntos que generan tráfico permanentemente se emplea la asignación fija, y ésta puede ser SCPC (cuando el tráfico es poco pero constante) o bien de **portadora multicanal o MCPC**. Una portadora multicanal transporta muchos canales que han sido previamente adecuados en forma adecuada y la ranura de frecuencias necesaria para ubicarla es muy angosta o muy ancha, dependiendo del número total de canales que contenga; estos pueden ser analógicos y digitales, con multiplexaje en frecuencia o en el tiempo.

### ***3.3.3 Acceso múltiple por división en el tiempo.***

El acceso múltiple por división en el tiempo o TDMA es una técnica totalmente digital mediante la cual varias estaciones terrenas accesan u ocupan un transpondedor o parte de él. A diferencia del acceso múltiple por división en frecuencia, en donde cada

estación transmisora tiene asignada una ranura de frecuencias dentro del transpondedor, normalmente con un ancho de banda diferente, en esta nueva técnica todo un grupo de estaciones tiene asignada la misma ranura, con cierto ancho de banda fijo, y se comparte entre ellas secuencialmente en el tiempo; cada estación tiene asignado un tiempo **T** para transmitir lo que guste dentro de la ranura, y cuando su tiempo se agota debe dejar de transmitir para que lo hagan las estaciones que le siguen en secuencia, hasta que le toque nuevamente su turno.

El tiempo **T** asignado a cada estación no es necesariamente igual en todos los casos, puesto que algunas estaciones conducen más tráfico que otras y, por lo tanto, la ranura de tiempo que se les asigne debe ser más larga que la de las estaciones chicas. Estos tiempos asignados pueden ser fijos por estación, en cuyo caso se tiene acceso múltiple por división en el tiempo con asignación fija, o bien puede variar en el tiempo cuando algunas estaciones tengan exceso de tráfico (horas pico). Un sistema TDMA es más complejo que uno de FDMA y necesita una buena coordinación entre todas las estaciones terrenas de la red que lo usan y una estación de referencia; como las estaciones transmiten en forma de ráfaga a intervalos con duración de una pequeña fracción de milisegundo, deben contar con módulos de almacenamiento de información digital, que funcionan como memorias de amortiguamiento y que van liberando la información por paquetes en cada ráfaga. Una de las grandes ventajas de esta técnica es que durante cada ranura de tiempo se pueden transmitir en forma multiplexada digitalmente, y por paquetes, porciones de canales telefónicos, de datos y hasta el video sobre la misma portadora de la ráfaga.

La modalidad de TDMA que se utiliza más en la práctica es la de ocupación del transpondedor completo por la portadora modulada; como sólo hay una portadora presente en cada instante dentro del amplificador de potencia de transpondedor, no hay ruido de intermodulación y se puede aprovechar al máximo la potencia de salida, beneficiándose de esta forma todas las estaciones terrenas que lo utilizan,.

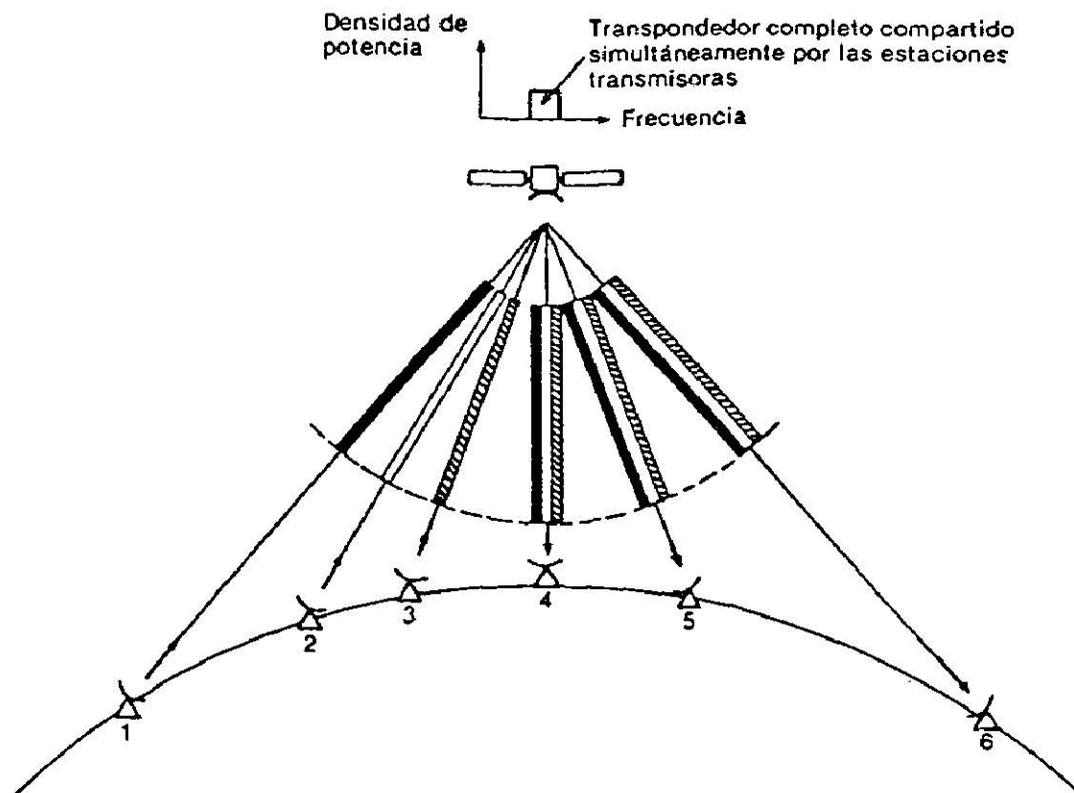
La técnica TDMA, al igual que la FDMA, no es más que una forma mediante la cual las estaciones terrenas comparten un transpondedor o parte de él. Independientemente del tipo de acceso que se utilice, es necesario que los canales de video, voz, datos que se van a transmitir pasen por varias etapas de procesamiento a partir de su estado de banda base (como son en su forma original), principalmente las etapas de modulación y multiplexaje, de las cuales hay una gran diversidad.

### ***3.3.4 Acceso múltiple por diferenciación de código.***

Esta es una alternativa en la que un transpondedor completo es ocupado por varias estaciones que transmiten a la misma frecuencia y al mismo tiempo. Esta técnica, denominada acceso múltiple por diferenciación de código o CDMA, y que aparentemente resulta imposible, es particularmente útil en transmisiones confidenciales o altamente sensitivas a la interferencia; al igual que TDMA, es totalmente digital, y presenta la

ventaja de que las antenas receptoras y transmisoras pueden ser muy pequeñas, sin importar que sus ganancias sean muy bajas y sus haces de radiación muy amplios. Por otra parte, presenta el inconveniente de que ocupa mucho ancho de banda ( un transpondedor completo ), pues cada bit de información como los que se transmiten en modalidad TDMA se transforma en un nuevo tren de bits muy largo, de acuerdo con un código determinado previamente.

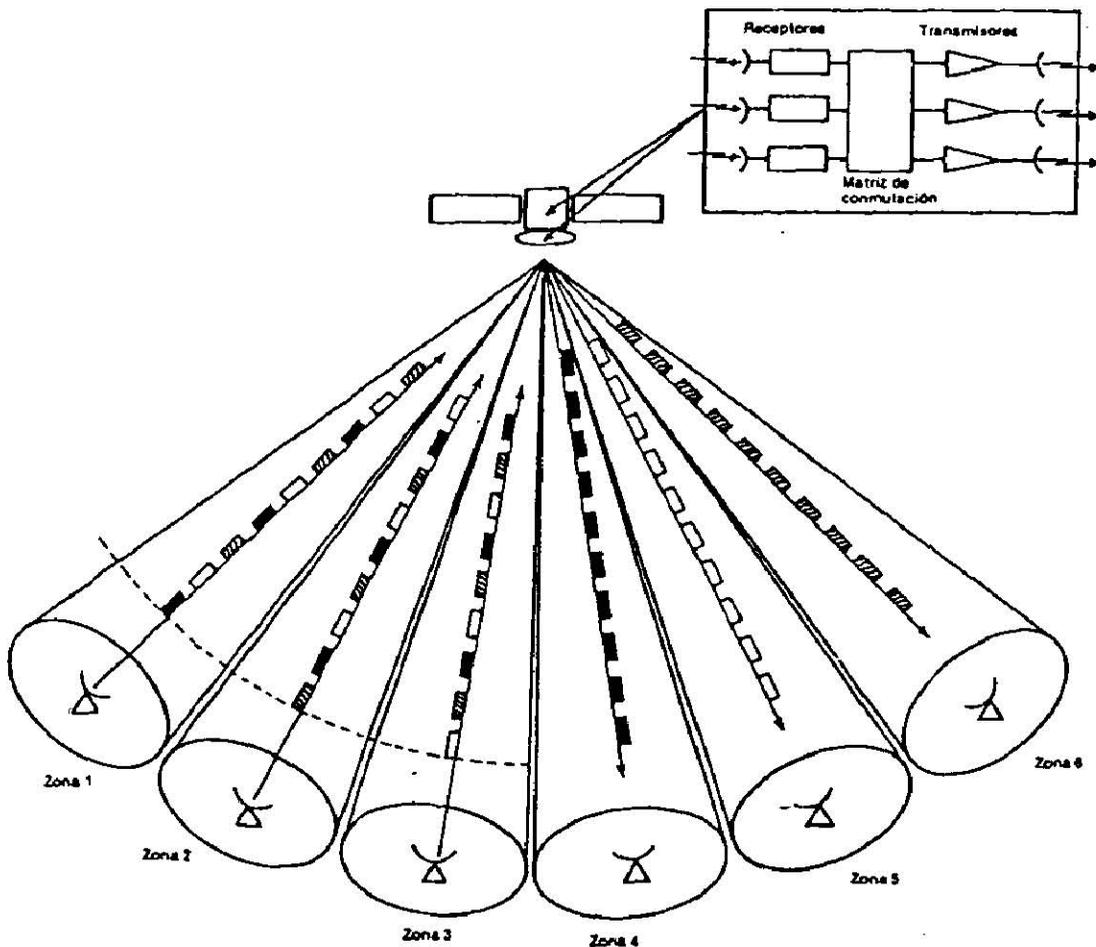
En la figura sig. Se muestra una red de seis estaciones terrenas que operan con la técnica de acceso CDMA. Cada estación transmisora utiliza una secuencia diferente de bits para codificar cada uno de los bits de información; de las estaciones terrenas receptoras, sólo la destinataria de cierta información determinada conoce el código con el que se transmitió y es capaz de reconstruir el mensaje original, aunque llegue superpuesto con todos los demás mensajes que se transmitieron simultáneamente, pues estos últimos sólo los detecta como "ruido" tolerable. En virtud de que el ancho de banda que utiliza este sistema es muy amplio, por la expansión del espectro en frecuencia de la señal al codificar los bits, también se le denomina acceso múltiple con espectro expandido o SSMA.



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.

### 3.3.5 Acceso Múltiple por división en el tiempo con conmutación en el satélite.

Los satélites más modernos se están construyendo con varias antenas de haz pincel, diseñadas para cubrir diferentes zonas geográficas con muy alta densidad de potencia; cada haz está asociado con ciertos receptores y transmisores y es posible conmutar parte de la información - o toda - de un haz a otro mediante una matriz de microondas. Este versátil y novedoso sistema es digital, con acceso múltiple TDMA; se denomina acceso múltiple por división en el tiempo con conmutación en el satélite o SS/TDMA.



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.

### 3.3.6 Frecuencias Asignadas y reutilización 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 Ghz, 8/7 Ghz, 14/11 o 14/12 GHz y 30/20 Ghz, respectivamente; dependiendo de la región, hay variaciones entre los límites inferior y superior de cada una de estas bandas. 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 operan con esa cantidad; sin embargo, ya se han asignado otras bandas adicionales muy cercanas, y el ancho de banda se ha incrementado a 1000 Mhz. La banda X es usada por satélites militares y gubernamentales. La banda Ka se encuentra aún en su etapa experimentación, pero pronto se lanzarán los primeros satélites comerciales que la aprovechen, en la sig. figura se muestra 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.

El espectro radioeléctrico disponible es finito, y con el fin de aumentar la capacidad de cada satélite se han desarrollado dos métodos para utilizar las frecuencias casi por duplicado: reutilización con aislamiento espacial y con discriminación de polarización.

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)

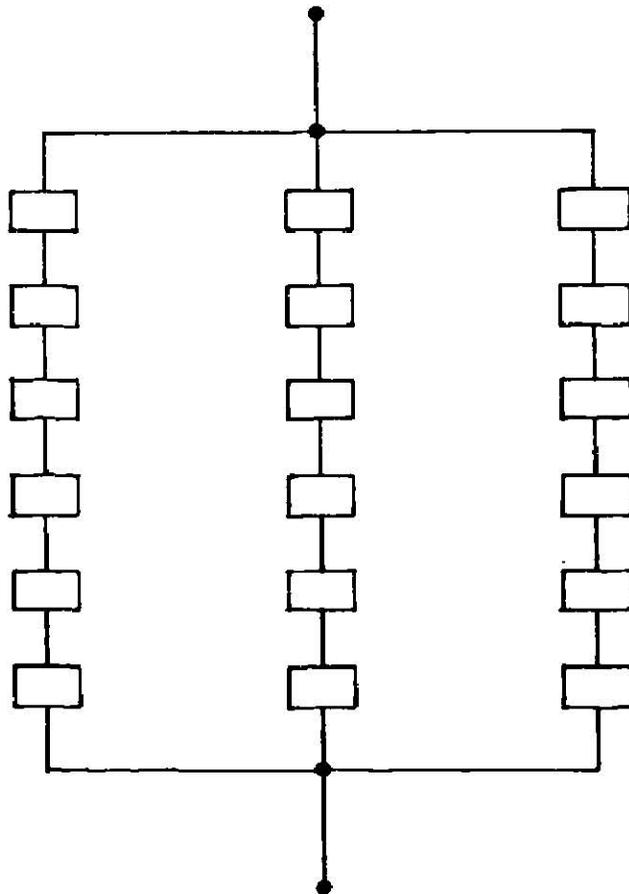
\* El ancho de banda se muestra entre paréntesis.

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.

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; estas pueden ser lineales ( horizontal y vertical ) o circulares ( derecha e izquierda ). Muchos satélites comerciales operan con este tipo de reutilización de frecuencias.

### 3.4 Subsistema de Energía Eléctrica.

Para funcionar adecuadamente, todo satélite necesita un suministro de energía eléctrica sin interrupción y sin variaciones significativas en los niveles de voltaje y corriente. La cantidad de potencia requerida por cada uno en particular depende de sus características de operación, y normalmente varía entre 500 y 2 000 watts. El subsistema de energía eléctrica consiste en 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.



Ejemplo de una conexión de celdas solares en serie y paralelo.

En las primeras horas del lanzamiento de un satélite, la electricidad es suministrada por baterías, aunque la fuente primaria de energía del satélite está constituida por arreglos de celdas solares. Hasta ahora, ningún satélite comercial de comunicaciones utiliza energía nuclear, pues los combustibles aún cuando son relativamente fáciles de usar y requieren un sistema de protección sencillo para que no dañen por radiación a los componentes electrónicos del satélite, son muy caros, por otra parte, los combustibles baratos, son peligrosos y pueden implicar un grave riesgo en perjuicio del medio ambiente. Sólo las sondas interplanetarias enviadas hacia los planetas exteriores justifican el uso de generadores de radioisótopos, pues la densidad de energía solar por unidad de volumen es muy baja en aquellas regiones.

Una gran desventaja que tienen las celdas solares es que su factor de eficiencia en la conversión de energía solar a eléctrica es muy bajo. En un principio era del orden del 8%; ahora se utilizan celdas con una tecnología mejor, que brindan factores de eficiencia del 10 al 12%, pues también aprovechan gran parte de la energía radiada por el sol en la región ultravioleta de su espectro.

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 estén expuestas las celdas solares; cuanto más baja sea ésta, mayor será el nivel de voltaje entregado por las celdas. Cada celda solar tiene una área de unos 5 cm<sup>2</sup>, y uniendo muchas de ellas en serie y en paralelo (fig. ant.) se forma un arreglo solar. Todas las celdas se ven expuestas durante toda 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, aún cuando llevan una cubierta de protección hecha de sílice fundido.

La intensidad de la radiación solar sobre las celdas del satélite no es constante, puesto que ésta se acerca o aleja del Sol junto con la Tierra al desplazarse alrededor de él, completando una vuelta cada año; cuando el satélite y la Tierra se acercan al Sol, la intensidad de la radiación solar sobre las celdas aumenta. La distancia del satélite al 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 la máxima durante los equinoccios y mínima en los solsticios.

Existen dos formas de mantener a los satélites geoestacionarios relativamente estables a su orientación con respecto a la Tierra, estas dos formas son la estabilización por giro y la estabilización triaxial. Los satélites estabilizados por giro son cilíndricos y llevan las celdas solares montadas sobre la mayor parte de su superficie, envolviendo casi totalmente su perímetro, los satélites con cuerpo fijo y estabilización triaxial no tienen una geometría cilíndrica, sino que se asemejan a un cubo o caja, y normalmente emergen dos largos y planos paneles solares de sus costados, en forma de alas.

En el caso de los satélites estabilizados por giro o rotación, no todas las celdas solares están expuestas al Sol en todo momento, y solamente se aprovecha una parte de ellas para efectuar la conversión a electricidad; de hecho, el porcentaje aprovechado en cada instante es de aproximadamente un tercio, a consecuencia de la parte oculta del Sol y la pared curva del cuerpo cilíndrico del satélite sobre el cual están montadas las celdas. Por lo que respecta a los satélites de cuerpo fijo con estabilización triaxial, en su inferior hay volantes inerciales que actúan como giróscopos y que mantienen estable al satélite sin necesidad de que este gire. Sus paneles solares cuentan con un mecanismo para orientarse constante y optimamente hacia los rayos del Sol; esto permite aprovechar al máximo las celdas, y todas al mismo tiempo, ya que la eficiencia de conversión es función del ángulo de incidencia de los rayos del Sol sobre ellas. Los satélites con este tipo de estabilización brindan mayor capacidad de generación de energía eléctrica que la de los estabilizados por rotación, se opta por ellos cuando los requerimientos de potencia lo exigen.

Durante toda su vida de operación, el satélite se ve expuesto a eclipses, y en estos casos necesita obtener su energía eléctrica de alguna otra fuente que no sea el Sol para poder seguir funcionando; esta fuente secundaria 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 la horas de mayor demanda de energía. En el momento en que ocurre un eclipse, ya sea de Tierra o de Luna, unos relevadores 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. Cuando éste concluye y el satélite queda otra vez expuesto a los rayos del Sol, las celdas solares vuelven a hacerse cargo como fuente primaria de energía al mismo tiempo que recargan las baterías para que estén listas cuando se les requiera nuevamente.

Las baterías que más se utilizan en los satélites geoestacionarios de comunicaciones son de níquel-cadmio; su eficiencia de potencia/peso es baja, pero se prefiere porque son muy confiables y de larga duración. Sin embargo, algunos satélites ya utilizan baterías de níquel-hidrógeno, que poseen importantes ventajas tecnológicas sobre las anteriores y que quizá poco a poco las irán reemplazando desde la fecha hasta el año 2000. Hay otros tipos de baterías que aún se encuentran en la etapa de investigación, por ejemplo, de plata-hidrógeno, litio y sodio.

### ***3.5 Subsistema de Control Térmico.***

Varias partes del satélite requieren rangos distintos de temperatura para operar eficientemente, y que es necesario mantener un balance o equilibrio térmico del conjunto para que dichos rangos se conserven. 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 de considerarse también.

La energía proveniente de la Tierra la integran dos tipos de radiación: la propia de ella y la del Sol reflejada por su superficie (albedo). 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 manera 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 obscuridad, y cuando está de nuevo expuesto a los rayos del Sol sufre otro cambio brusco de temperatura.

La transferencia de 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. Los dispositivos electrónicos que generan más calor: los amplificadores de potencia.

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. Así por ejemplo: la pintura blanca absorbe la radiación infrarroja de la Tierra, pero rechaza el flujo solar; su emitancia es muy alta y su absorbencia es muy baja, de manera que se comporta como un elemento frío frente al Sol. Por otra parte, la pintura negra también tiene una emitancia alta, pero al mismo tiempo posee una absorbencia muy alta, y cuando está expuesta al Sol su temperatura es superior a los  $0^{\circ}\text{C}$ , a diferencia de la pintura blanca cuya temperatura puede ser inferior a los  $-50^{\circ}\text{C}$ . Entre otros acabados, también se utiliza en algunas secciones la pintura de aluminio. Es así como, mediante la combinación de colores y materiales, y con el auxilio de reflectores ópticos, el equilibrio térmico del satélite se conserva dentro de un nivel aceptable de temperaturas durante la mayor parte del tiempo.

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 los componentes más sensibles a las bajas temperaturas dejarían de funcionar correctamente, unos de los elementos más sensibles al frío son, por cierto las baterías, que irónicamente son las responsables de suministrar energía eléctrica al satélite durante el eclipse, y por lo tanto es preciso 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 evaporización 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.

### ***3.6 Subsistema de Posición y Orientación.***

El objetivo de un satélite de comunicaciones es recibir señales radioeléctricas de alguna parte de la Tierra y retransmitirlas hacia otra a través de su subsistema de antenas direccionales, que por supuesto deben estar permanentemente orientadas 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 técnicas de **estabilización por giro o de estabilización triaxial.**

En los primeros satélites que utilizaron antenas de haces direccionales, éstas se hacían girar en sentido contrario al giro del cuerpo cilíndrico del satélite, de tal forma que en realidad no se movían con relación a la superficie terrestre. Esta solución perdió practicidad al ir evolucionando las generaciones de satélites, y hoy sólo una parte de su cuerpo gira mientras que el resto de su estructura -que incluye a las antenas- permanece fijo; la unión entre la sección que gira y la que no gira es un mecanismo de rodamiento y transferencia de energía eléctrica con muy poca fricción. El satélite al girar sobre su eje (que es paralelo al de rotación de la Tierra) se vuelve menos vulnerable a las fuerzas perturbadoras.

Los satélites con estabilización triaxial no giran, la estabilización se conserva mediante volantes giratorios que van colocados en su interior.

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 Tierra. Por lo tanto es preciso poder determinar, de alguna manera y en todo momento, dónde está el satélite y cuál es la orientación exacta de su cuerpo. Para conocer la posición, se requiere medir la distancia a la que se encuentra y en qué dirección o ángulo con relación a algún punto de referencia sobre la Tierra (el centro de control). 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 señal recibida es un indicador de lo lejos que se encuentra. 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. La técnica de máxima recepción es otra alternativa para medir el ángulo, requiere una estación terrena y no dos; opera bajo el principio de orientar la antena hacia el satélite e ir la moviendo poco a poco

hasta que se detecte el nivel máximo de radiación. Cuando se obtiene la posición de máxima recepción, se considera que la antena de la estación terrena está perfectamente orientada hacia el satélite, y por lo tanto se puede conocer la dirección o ángulo en 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 más comunes son los de Sol y los de la 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. Por lo tanto, si de alguna forma se conoce la cantidad de corriente generada, es posible relacionarla con la dirección en la que se encuentra el Sol; es decir, se mide un ángulo entre la dirección en la que se halla el Sol y uno de los ejes del cuerpo del satélite. Por su parte, 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. La cantidad de calor que reciben estos dispositivos depende de su orientación con relación a la superficie de la Tierra, y si el satélite cambia su orientación, los sensores van detectando estas variaciones; todas las mediciones anteriores se deben hacer con la mayor precisión posible y que el diseño y fabricación de los sensores implica una tecnología muy avanzada.

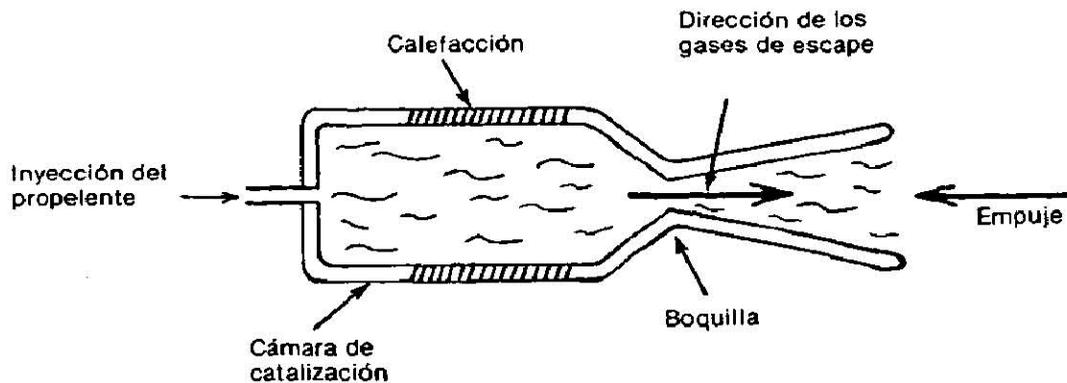
### ***3.7 Subsistema de Propulsión.***

El subsistema de propulsión o de control remoto a reacción 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 y eléctricos, pero los primeros son los de mayor uso porque proporcionan niveles de empuje cientos o miles de veces más 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 cantidad de 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. Es de esperarse que si se desea reducir al mínimo posible el peso total del combustible almacenado en el satélite, para economizar en los costos del lanzamiento, es deseable utilizar propulsores que funcionen con combustible de impulso específico muy alto; para efectuar las correcciones de posición y orientación del satélite se requiere aplicar empujes de duración determinada hasta obtener el incremento de velocidad necesario en la dirección deseada.

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 área transversal y después se ensancha (véase figura siguiente). Los primeros sistemas de control a reacción utilizaban gases fríos como el nitrógeno y el peróxido de hidrógeno; sin embargo, su impulso específico era muy bajo - del orden de los 70 segundos - y muy pronto fueron sustituidos por la hidrazina monopropelente que en la actualidad goza de mucha popularidad.

En la actualidad existe cada vez más 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. Al unirse las dos sustancias se produce una combustión instantánea sin necesidad de algún sistema de ignición; que al combinarse producen un impulso específico del orden de 300 segundos. La ventaja o el atractivo que ofrecen los propulsores bipropelentes es que permiten diseñar un sistema unificado de propulsión que a la vez sirva para colocar al satélite en su órbita definitiva tanto como para realizar maniobras de corrección de orientación y posición durante todos sus años de vida, utilizado para ello los mismos tanques de almacenamiento de combustible. Esta versatilidad conlleva algunos ahorros en la masa total del satélite, al no ser ya necesario un subsistema de control a reacción independiente en combinación con un motor de apogeo de combustible sólido.



Cámara de catalización y boquilla de escape de un propulsor monopropelente.

En cuanto a los propulsores eléctricos se refiere, éstos 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, siendo los más estudiados los de plasma y los de ionización de mercurio y de cesio.

### ***3.8 Subsistema de Rastreo, Telemetría y Comando.***

Este subsistema permite conocer a control remoto la operación y posición del satélite, así como enviarle órdenes para que 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 a una señal digital que el satélite transmite hacia la Tierra con una velocidad baja, entre 200 y 1000 bits por segundo, y esta información permite conocer el estado de operación del sistema satelital, apoyada 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. Durante los años de vida operacionales del satélite, este amplificador es el mismo de alguno de los transpondedores empleados para las comunicaciones en general, ya que las señales transmitidas y recibidas por el subsistema de telemetría, rastreo y comando ocupan muy poco ancho de banda y pueden compartir el mismo amplificador de banda C o Ku con otro tipo de señales de comunicaciones. Solamente durante las maniobras de colocación en órbita es común utilizar un amplificador que funcione a frecuencias mucho más bajas que las de la banda C y ku; en esta etapa importante de su lanzamiento se emplean las bandas de VHF y S, cuyas frecuencias son, respectivamente, de aproximadamente 140 MHz y 2 GHz, y las transmisiones y recepciones se efectúan utilizando las antenas de rastreo, comando y telemetría.

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, o bien -durante la colocación en órbita- extender los paneles solares, mover las antenas y encender el motor de apogeo y perigeo. 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, éstos 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 requeridos.

### ***3.9 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 ve sujeto desde el momento en que abandona la superficie de la Tierra; este importante subsistema debe ser durable, resistente y lo más ligero posible.

Durante las diversas etapas de su lanzamiento y transferencia de órbita, el satélite se enfrenta a vibraciones, aceleraciones, esfuerzos aerodinámicos, fuerzas centrífugas, empujes de los propulsores y esfuerzos mecánicos, Cada vez que se desprende alguna etapa del cohete que lo transporta o de él mismo. Cuando llega a su posición orbital final, y tal y como ya se ha indicado, el satélite se ve afectado por impactos de micrometeoritos, presiones de radiación de las antenas, fuerzas de atracción de la Tierra, la Luna y el Sol, y empujes generados por su propio subsistema de propulsión. En consecuencia, tanto la estructura del satélite como cada una de las demás partes que lo componen deben diseñarse para que soporten esas condiciones durante la colocación en órbita y el tiempo esperado de vida. Para ello, el diseñador tiene a su alcance una diversidad de materiales para diseñar la estructura, así como muchos otros conceptos geométricos derivados de la experiencia obtenida en aeronáutica a través de los años. 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 más caro, y por lo 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 sea el caso) se fabrica como “panal de abeja” (honeycomb) de aluminio, por su ligereza y rigidez excelentes.

## **BIBLIOGRAFIA.**

Libro : Satélites de Comunicaciones  
Autor : Rodolfo Neri Vela  
Editorial : McGraw Hill  
Fecha : Noviembre de 1989

