

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA



## COMUNICACION VIA SATELITE

TESINA

PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO EN ELECTRONICA  
Y COMUNICACIONES

PRESENTA  
EDDY PEREZ GARCIA

ASESOR: ING. FERNANDO ESTRADA SALAZAR

CD. UNIVERSITARIA

JULIO DE 1999

T

TK5104

P46

1999

c.1

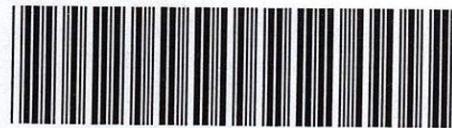
T

TK5104

P46

1999

c.1



1080097039

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA



# COMUNICACION VIA SATELITE

TESINA

PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO EN ELECTRONICA  
Y COMUNICACIONES

PRESENTA  
EDDY PEREZ GARCIA

ASESOR: ING. FERNANDO ESTRADA SALAZAR

CD. UNIVERSITARIA

JULIO DE 1999

T  
TKS104  
P46  
1977



**Universidad Autónoma de Nuevo León**

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**

# **Comunicación Vía Satélite**

**T E S I N A**  
**PARA OBTENER EL TITULO DE:**  
**INGENIERO EN ELECTRONICA Y COMUNICACIONES**

**PRESENTA.**  
**EDDY PEREZ GARCIA**

**ASESOR. ING. FERNANDO ESTRADA SALAZAR**

**CD. UNIVERSITARIA**

**JULIO 1999.**

# **Agradecimientos**

## **A mis padres:**

Víctor M. Pérez de la Cruz  
y Ma. del Carmen García García

Por el gran apoyo y la confianza que siempre me brindaron,  
que influyó totalmente para lograr mi objetivo de terminar mi  
Carrera Profesional.

## **A mis hermanos:**

Manuel Alberto, Jenny, Luis Enrique,  
Darwin y Víctor Alejandro

Por compartir esos grandes momentos de alegría y el apoyo  
de siempre para salir adelante.

## **A mis amigos:**

Que durante la Carrera Profesional compartimos buenos  
momentos y siempre me apoyaron.

Agradezco a la Facultad de FIME y a todos los  
catedráticos por su apoyo académico y formación para  
lograr una de las metas más importantes: El obtener  
una carrera universitaria y poder desarrollarme como  
un profesional dentro de ella.

# INDICE

|   |    |
|---|----|
| Introducción . . . . .  | 1  |
| Capítulo I. CARACTERÍSTICAS DE LA SEÑAL DE SATÉLITE . . . . .                 | 2  |
| Satélites . . . . .   | 2  |
| Ventajas de la Comunicación Vía Satélite . . . . .                            | 2  |
| Clasificación de los Satélites . . . . .                                      | 3  |
| Capítulo II. LANZAMIENTO Y COLOCACIÓN EN ORBITA GEOESTACIONARIA . . . . .     | 6  |
| El Cinturón de Clarke . . . . .   | 6  |
| Cómo llegar a la Orbita Geoestacionaria . . . . .                             | 8  |
| Inyección Directa en Orbita Geoestacionaria . . . . .                         | 8  |
| Inyección Inicial en Orbita Elíptica . . . . .                                | 9  |
| Inyección Inicial en Orbita Circular Baja . . . . .                           | 9  |
| Capítulo III. EL SATÉLITE Y EL MEDIO AMBIENTE . . . . .                       | 13 |
| Las Fuerzas Perturbadoras . . . . .   | 13 |
| La Temperatura del Satélite . . . . .   | 16 |
| Capítulo IV. DESCRIPCIÓN A CUADROS DE UN SATÉLITE . . . . .                   | 19 |
| El Intelsat III . . . . .   | 19 |
| Rescate de Satélites . . . . .  | 24 |
| Capítulo V. CIRCUITO HIPOTETICO DE REFERENCIA . . . . .                       | 27 |
| Capítulo VI. SUBSISTEMAS DE UN SATÉLITE Y SUS PRINCIPALES FUNCIONES . . . . . | 31 |
| Subsistemas de Antenas . . . . .  | 31 |
| Subsistemas de Comunicaciones . . . . .                                       | 35 |
| Subsistemas de Energía Eléctrica . . . . .                                    | 50 |
| Subsistemas de Control Térmico . . . . .                                      | 57 |
| Subsistemas de Posición y Orientación . . . . .                               | 59 |
| Subsistemas de Propulsión . . . . .   | 63 |
| Subsistemas de Rastreo, Telemetría y Comando . . . . .                        | 65 |
| Subsistemas Estructural . . . . .   | 68 |
| Bibliografía . . . . .  | 69 |

# INTRODUCCIÓN

El hombre ha desarrollado las computadoras hasta superar con amplitud la fase de la señal física o corporal. Buena parte de ello son el lenguaje, el servicio de correo, los libros, el telégrafo, el teléfono, la radio, la televisión, etc.

Los descubrimientos e invenciones han permitido un mundo de comunicaciones en masa. Hoy en día es común que dos personas situadas en puntos opuestos de la Tierra conversen.

Uno de los resultados obtenidos a partir de los programas espaciales es la llegada de los satélites artificiales. La llegada de estos aparatos electrónicos complejos y el desarrollo de estos ha modificado la forma de vida de la población mundial. Gracias a este desarrollo se conoce con más precisión los recursos naturales de la Tierra, los fenómenos meteorológicos, las distancias se han acortado y se puede intercambiar todo tipo de información, y más allá de las capas atmosféricas podemos observar y comprender el universo.

La comunicación por satélite es una vigorosa industria global que ha tenido un tremendo crecimiento en los últimos treinta años. Muchos sistemas satelitales, internacionales, regionales y domésticos están supliendo exitosamente, voz, datos, televisión y otros servicios. Una investigación en este campo ha permitido una mayor capacidad en los sistemas; estaciones terrenas y una reducción en costos de servicios convencionales. Nuevas ideas están siendo introducidas constantemente para aumentar las capacidades de los nuevos sistemas y ofrecer nuevos servicios, tales como comunicación personal a través de unidades portátiles en cualquier parte del mundo.

# CAPÍTULO I

## CARACTERÍSTICAS DE LA SEÑAL DE SATÉLITE

### SATÉLITES.

Un satélite no es más que una repetidora (en el rango de las microondas) puesta en el espacio, un satélite no crea transmisiones por si mismo, sólo retransmite o releva lo que recibe de la Tierra. El Satélite recibe la señal proveniente de la tierra en la banda llama Up-Link y la regresa en la banda Down-Link produciéndose un retardo de aproximadamente 0.26 seg. 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 o más repetidoras. Por otra parte el satélite permite el "salto" de los océanos para lograr la comunicación intercontinental de alta capacidad.

### VENTAJAS DE LA COMUNICACIÓN VÍA SATÉLITE.

- Simplificación del Sistema: Debido a su gran altura (aproximadamente 36,000 km.) se tiene línea de vista entre el satélite y cualquier estación terrena que esté dentro de su área de cobertura la cual puede llegar a ser tal, que se cubriría prácticamente el 40% de la superficie de la tierra con un solo satélite.
- Mayor Calidad: Debido a que cualquier proceso electrónico degrada la señal al agregar algo de ruido (aunque sea en grado 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 o más repetidoras, por lo tanto o 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.

- 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 al sistema.
- 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 más amplio y por lo tanto el tener una gran capacidad de manejo de información.

## **CLASIFICACIÓN DE LOS SATÉLITES.**

- De acuerdo a su principio de operación. Los satélites se clasifican en:
  - ⇒ Activos: Cuando se involucra un proceso electrónico.
  - ⇒ Pasivos: Cuando el satélite actúa solamente como superficie reflectora (Ya no se utilizan actualmente).
- De acuerdo a su aplicación: Podemos clasificar a los satélites en dos grupos:
  - ⇒ Civiles: En los que se incluyen los de comunicaciones, los meteorológicos, los de investigación, etc.
  - ⇒ Militares: Servicio destinado a asuntos destinados a servicios militares.
- De acuerdo a su Orbita: Podemos clasificar a los satélites en dos grupos:
  - ⇒ Geoestacionarios: Es aquel que permanece fijo con respecto a la tierra.
  - ⇒ No Geoestacionarios: El cual aparecería siempre en movimiento con respecto a la tierra, un ejemplo de esto es la luna.

En general podemos decir que los sistemas de comunicación vía satélite requieren de una órbita geoestacionaria por las ventajas que esto implica.

- ✓ Al permanecer fijo el satélite con respecto a la tierra no es necesario rastrear el movimiento para orientar la antena, es decir, una vez que se localiza el satélite y se orienta la antena ésta permanece fija.
- ✓ Una vez orientada la antena se dispondrá del satélite todo el tiempo, ya que este permanece fijo, lo que permite la continuidad del sistema las 24 horas del día, condición necesaria para un sistema de comunicaciones.
- De acuerdo a su cobertura: Clasificaremos a los satélites en globales y domésticos.

⇒ Globales: Cuando su transmisión cubra todo el espacio sobre la tierra.

⇒ Doméstica: Cuando su transmisión cubra solo un área específica que puede ser grande o pequeña según sean los requerimientos (por ejemplo un país).

Aquí se incluyen un tipo de satélites con cobertura intermedia entre la global y la doméstica es decir "regionales" cuyo objetivo es cubrir varias zonas específicas, por ejemplo, varios países o alguna región de ellos.

Los servicios que se pueden prestar a través de los satélites geoestacionarios de comunicaciones se dividen en dos grandes grupos:

*Servicio Fijo:* El cual consiste en uno o varios satélites y las estaciones terrenas que se intercomunican a través de ellos, con la particularidad de que

las estaciones siempre permanecen en el mismo punto geográfico, es decir, son fijas.

*Servicio Móvil:* Muchos usuarios que requieren comunicarse por satélite tienen la característica de que sus equipos no permanecen fijos, sino que se mueven o cambian de lugar constantemente, por ejemplo, en barcos, plataformas marinas, aviones, trenes, camiones de carga, automóviles. Las redes de comunicaciones que satisfacen esta demanda pertenecen a la rama del "servicio móvil" vía satélite. En estos casos las personas a bordo de vehículos pueden comunicarse con otros vehículos o con puntos fijos, por ejemplo, el capitán de un barco puede adelantar muchos trámites con las autoridades del próximo puerto en su ruta, otro ejemplo, un hombre de negocios a bordo de un vuelo comercial trasatlántico puede llamar a sus oficinas centrales, etc.

En cualquiera de los casos, el equipo de comunicaciones del vehículo debe tener una antena capaz de permanecer en contacto con el satélite geoestacionario, independientemente de su movimiento, por ejemplo, del oleaje, o del cambio de dirección en el caso del barco, o de las curvas y pendientes del camino en el caso de un automóvil.

## **CAPÍTULO II**

# **LANZAMIENTO Y COLOCACIÓN EN ORBITA GEOESTACIONARIA**

### **EL CINTURÓN DE CLARKE**

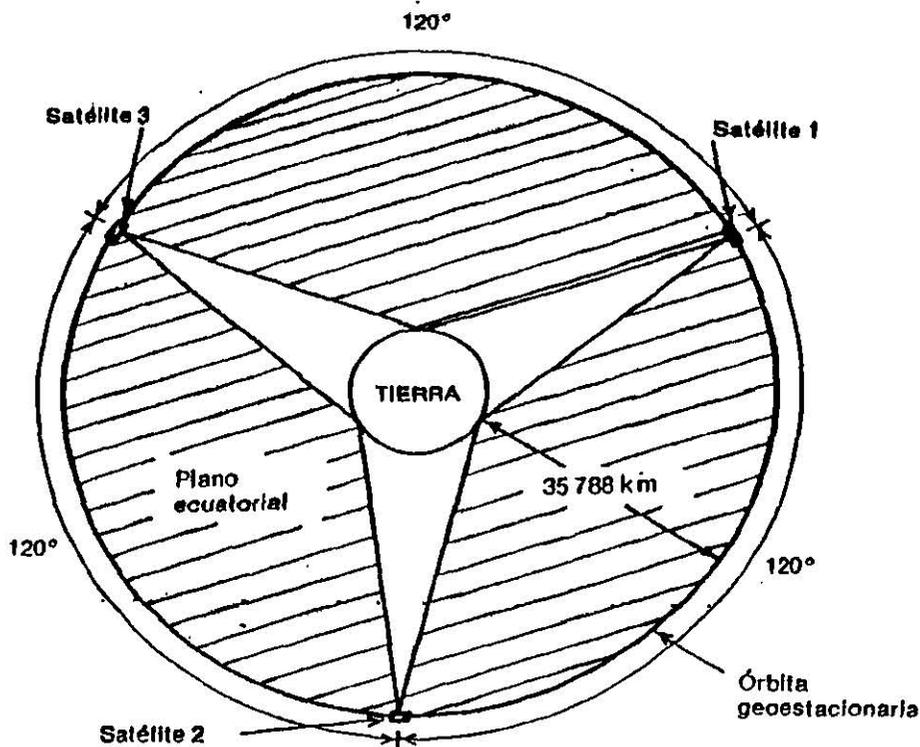
En 1945, Arthur C. Clarke sugirió en una de sus publicaciones la posibilidad de colocar satélites artificiales en una de las órbitas tal que observarlos desde un punto sobre la superficie de la tierra parecería que no se moviesen, como si estuviesen colgados en el cielo. Los satélites no cambiarían aparentemente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

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

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

Sin duda fueron muchos los científicos e ingenieros que leyeron con interés las ideas de Arthur C. Clarke y de otros autores contemporáneos. Cabe

mencionar que en aquel entonces todavía no se lanzaba ni siquiera el primer satélite artificial de la tierra, ya no se diga en órbita GEOESTACIONARIA a 36,000 km. de altura sobre el nivel del mar, sino aunque fuese a unos cuantos cientos de kilómetros de distancia. La órbita en cuestión recibe el nombre de *Órbita Geoestacionaria*, pero con frecuencia muchos autores e investigadores también se refieren a ella como el *Cinturón de Clarke*, es justo reconocimiento a su promotor. En la actualidad, esta 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: meteorológicos, militares, experimentales y de comunicaciones.



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.

## **COMO LLEGAR A LA ÓRBITA GEOESTACIONARIA.**

Sin las leyes de Isaac Newton que rigen la mecánica clásica, seguramente los científicos del siglo XX no hubieran podido colocar satélites alrededor de la tierra. Gracias a él 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, así mismo, que si a un cuerpo se le aplica una acción este responde con una reacción igual y de sentido contrario, oponiéndose a la acción original. Estas deducciones de Newton que datan del siglo XVII hacen posible que le hombre actual lance vehículos de carga (cohetes o lanzadores) con satélites artificiales en su interior, y que estos últimos conserven su posición orbital en el espacio una vez que han llegado ahí.

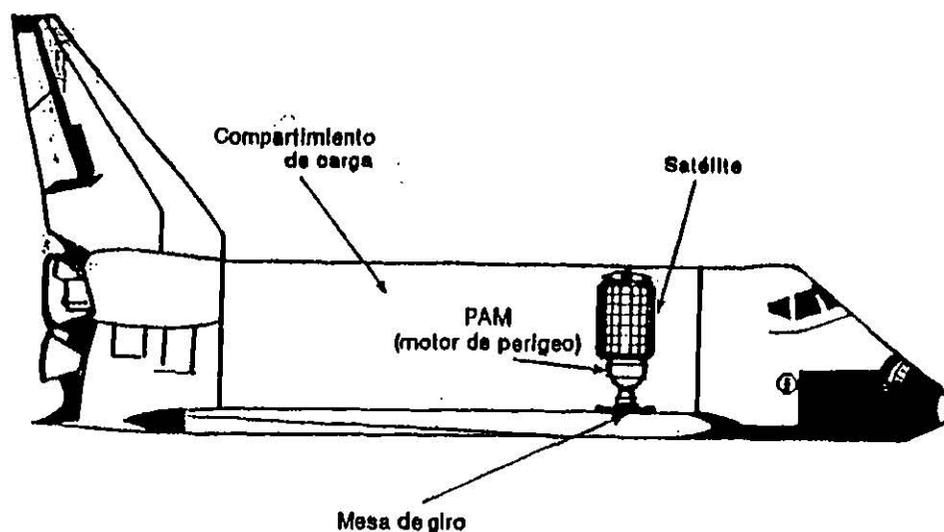
Todos los sistemas satelitales hacen uso de los principios anteriores y de muchos otros, como por ejemplo las leyes de Kepler, que explican el movimiento de los planetas alrededor del sol, pues los satélites se pueden interpretar en sentido figurado como si fuesen planetas y la tierra como un sol, aunque todo a escala mucho menor. 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 geoestacionaria. Para llevar a un satélite a esa órbita tan especial existen tres procedimientos distintos, los cuales se describen a continuación.

## **INYECCIÓN DIRECTA EN ÓRBITA GEOESTACIONARIA.**

En este caso, el satélite es transportado por un cohete de varias etapas hasta el Cinturón de Clarke, sin que necesite realizar esfuerzos propios, lo que en cambio si es necesario en los otros dos procedimientos que se explican más adelante.

La inyección directa en órbita geostacionaria es muy costosa y solo se utiliza para lanzar satélites militares; como el satélite no realiza esfuerzos propios, es decir, no lleva motores acoplados directamente a él, para pasar de una órbita a otra, la probabilidad de que llegue a su destino en buenas condiciones aumenta.

El Cohete Titán IIIC de los EE.UU. es un ejemplo de lanzador que puede emplearse con este fin.



Configuraciones de un satélite almacenado en el compartimento de carga de un orbitador.

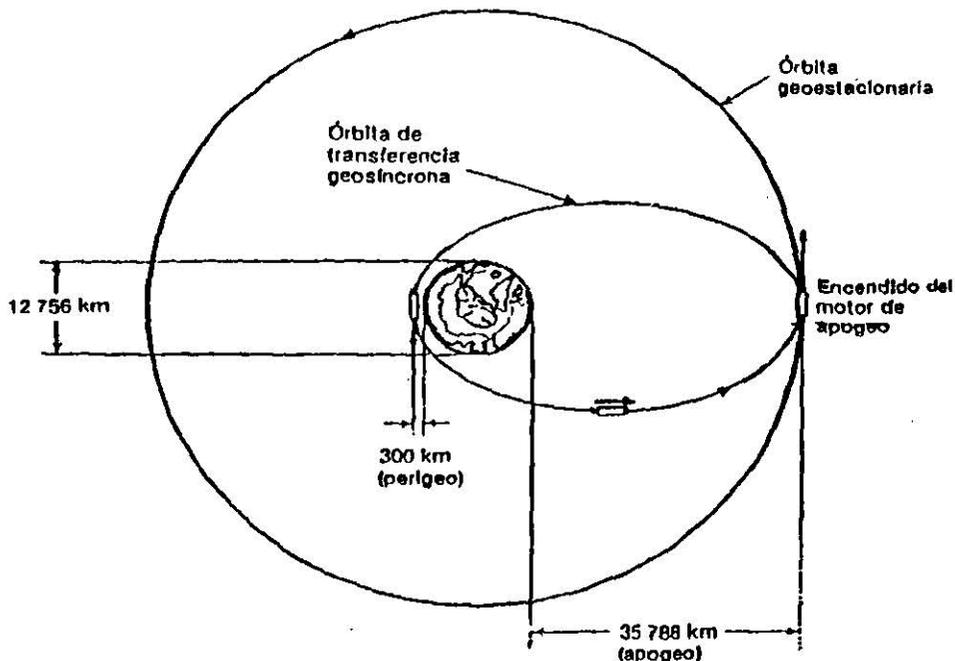
### INYECCIÓN INICIAL EN ÓRBITA ELÍPTICA.

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 dos focos, una vez ahí, el satélite se separa del cohete y da una o varias vueltas en esa órbita, llamada *transferencia*

*geosincrónica*, hasta que se lleva a cabo la siguiente etapa del proceso, ya con esfuerzos propios de el mismo.

El perigeo de la órbita de transferencia geosincrona esta normalmente a una altura aproximada de 200 km. sobre el nivel del mar y su apogeo cerca de 35,788 km., que es la altura final en la que el satélite debe quedar para funcionar.

El paso siguiente es circular la órbita y para ello el satélite lleve acoplado un motor que se enciende precisamente en el punto de apogeo de la última vuelta elíptica que se haya programado; obviamente, el encendido se efectúa después de haber orientado el satélite a control remoto en forma adecuada, para que el empuje del motor de apogeo resulte en la dirección correcta. Al encenderse este, el satélite recibe un incremento sustancia de velocidad y su órbita cambia pasando de la elíptica de transferencia geosincronica a la circular geoestacionaria.



Algunos cohetes, como los Ariane de la Agencia Espacial Europea, colocan los satélites geoestacionarios en dos pasos. El satélite se pone primero en una órbita elíptica de transferencia geosincronica 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.

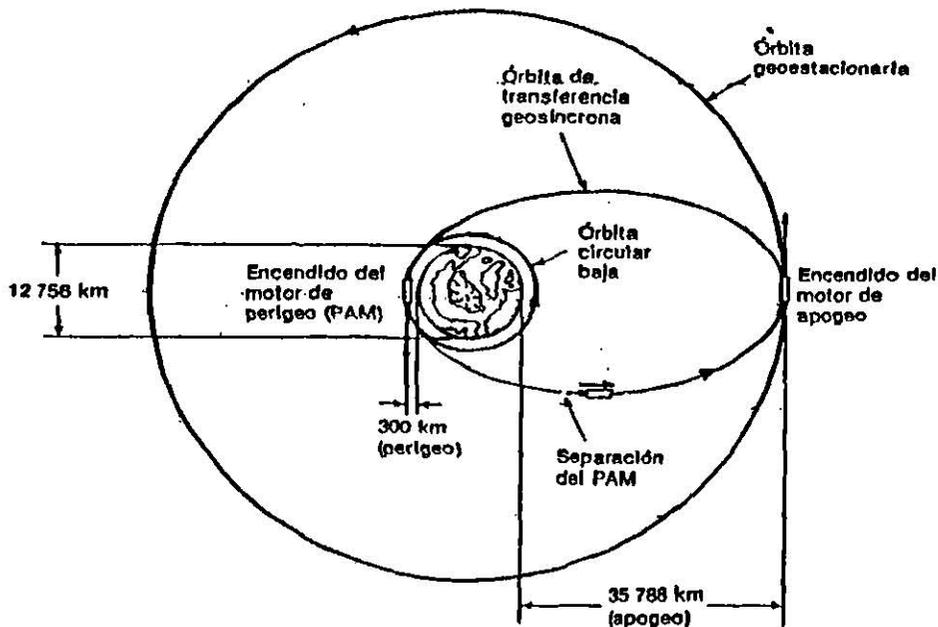
## **INYECCIÓN INICIAL EN ÓRBITA CIRCULAR BAJA.**

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 despega llevando el satélite en su compartimento 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 unas de las muchas vueltas que da la nave, el satélite es liberado o arrojado del compartimento de carga, quedando de esta forma también en órbita circular baja alrededor de la tierra, aunque separado del vehículo espacial; la velocidad inicial del satélite es la misma que la de la nave aunque ligeramente modificada por efecto de los resortes que se emplean para arrojarlo del compartimento de carga. La separación se efectúa cuando la nave va cruzando al plano del ecuador, y cuarenta y cinco minutos mas tarde, cuando el satélite vuelve a cruzar el plano del ecuador, su motor de perigeo se enciende. Este le da un empuje tal que modifica su órbita cambiando la de circular baja o de estacionamiento a una elíptica, similar a la del segundo caso explicado anteriormente.

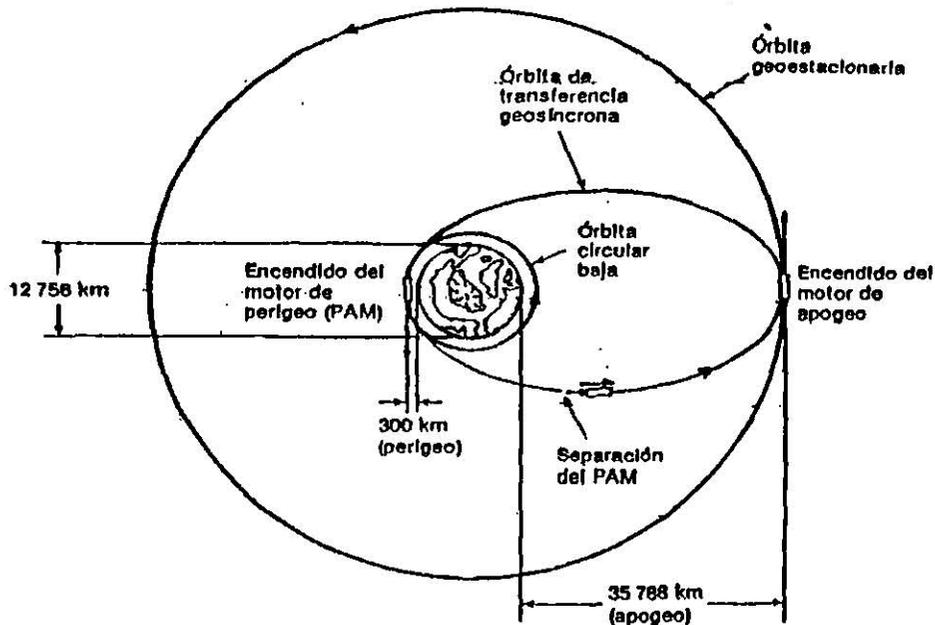
Una vez que ha cumplido su función, el motor de perigeo se desprende del resto del cuerpo del satélite, dando así las condiciones adecuadas para que, mas adelante y en el momento preciso, un motor de apogeo acoplado al cuerpo del satélite se encienda para circularizar la órbita con su altura final.

En realidad, el procedimiento para colocar un satélite en órbita geoestacionaria no es tan simple como parece ser de acuerdo con los tres métodos descritos. No solamente hay que proporcionarle cambios o incrementos de velocidad del satélite para modificar la geometría de las órbitas que formen parte del procedimiento elegido, sino que al mismo tiempo también hay que lograr pasar de un plano al otro, y todo ello haciendo el menor consumo posible de energía (combustible) para reducir los costos de lanzamiento. A continuación se describe con mayor detalle el caso particular en el que se utiliza el Sistema de Transportación Espacial de la NASA.



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

En realidad, el procedimiento para colocar un satélite en órbita geoestacionaria no es tan simple como parece ser de acuerdo con los tres métodos descritos. No solamente hay que proporcionarle cambios o incrementos de velocidad del satélite para modificar la geometría de las órbitas que formen parte del procedimiento elegido, sino que al mismo tiempo también hay que lograr pasar de un plano al otro, y todo ello haciendo el menor consumo posible de energía (combustible) para reducir los costos de lanzamiento. A continuación se describe con mayor detalle el caso particular en el que se utiliza el Sistema de Transportación Espacial de la NASA.



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

## **CAPÍTULO III**

### **EL SATÉLITE Y EL MEDIO AMBIENTE**

#### **LAS FUERZAS PERTURBADORAS.**

¿Cuáles son las fuerzas que causan tantos problemas para conservar el satélite fijo en su posición geoestacionaria? La fuerza que mas 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 este 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 en el sur del océano pacífico que sobre un punto de el continente africano, aun cuando ambos puntos de medición estén a la misma altura sobre el nivel del mar.

Más aun la tierra no es una esfera perfecta, sino que esta achatada en sus polos, y el círculo, sino una elipse aunque de muy poca excentricidad; el eje mayor de esta 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 esta debería de ser una esfera perfecta, y además su masa tendría que estar mezclada homogéneamente; ambas cosas son, por supuesto imposibles, dada la manera en que se formo y que gira sobre su propio eje.

La no uniformidad del campo gravitacional de la tierra, combinada con el hecho de que la estructura del satélite tampoco tiene una masa homogénea, puesto que sus piezas están fabricadas con una gran diversidad de materiales, produce un par gravitacional. Este par o fuerza hace que el satélite gire alrededor de su centro de masa y que su velocidad varíe conforme se desplaza sobre su órbita; dicho cambio de velocidad o aceleración provoca a su vez que el satélite

cambie de posición en longitud, es decir que se mueva a la derecha o a la izquierda (oeste o este) sobre el arco geoestacionario, dentro de la caja imaginaria.

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 mas lejos del satélite que este de la superficie del planeta, su efecto comparativo es mínimo, al igual que en el caso de la fuerza gravitacional perturbadora del sol.

De cualquier manera, la combinación de estas fuerzas produce un movimiento del satélite perpendicular al plano ecuatorial, es decir, hacia arriba o hacia abajo (norte o sur) dentro de la caja imaginaria. Esto origina una inclinación de su plano orbital de operación con respecto al plano ecuatorial en el que idóneamente debería permanecer. Tal inclinación indeseable entre ambos planos es del orden del 1° por año, medio hacia el plano de la elíptica 1; un 30% de esta inclinación se debe al efecto del sol y un 70% al de la luna. Dicha atracción combinada de la luna y del sol produce además una pequeña variación en la posición longitudinal del satélite, aunque no es tan importante como la causada por el campo gravitacional de la tierra.

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. Esta fuerza acelera el satélite y su efecto es mayor en satélites que tienen sus arreglos solares montados sobre paneles desplegables o extensibles que sobre satélites de configuración cilíndrica, puesto que en el primer caso la superficie total expuesta a la presión de la radiación solar es mucho mayor; el principal efecto de esta fuerza es cambiar la excentricidad de la órbita del satélite, y como el

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 en realidad su efecto es despreciable en comparación con los dos de las fuerzas comentadas anteriormente. 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. Por otra parte, la posición y orientación del satélite no son modificadas solamente por las 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.

Conviene apuntar que conforme los tanques de combustible 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 la masa; esto produce pares o fuerzas igualmente 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 esta concentrada en un haz de iluminación muy angosto. Esta fuerza origina un giro del satélite, y para reducir al máximo su efecto sobre el, 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.

Como puede verse, el nuevo hogar del satélite es muy inestable, y por ello su subsistema de propulsión es sumamente importante para poder mantenerlo dentro de la habitación que le corresponde en el espacio, es decir, dentro de su caja imaginaria. Sin embargo, hasta ahora solo se ha hablado de los efectos perturbadores mecánicos o de movimiento sobre el satélite; a continuación se mencionan otros, que también puede alterar su funcionamiento correcto, como son la radiación solar, las partículas cósmicas y las eclipses.

## **LA TEMPERATURA DEL SATÉLITE.**

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

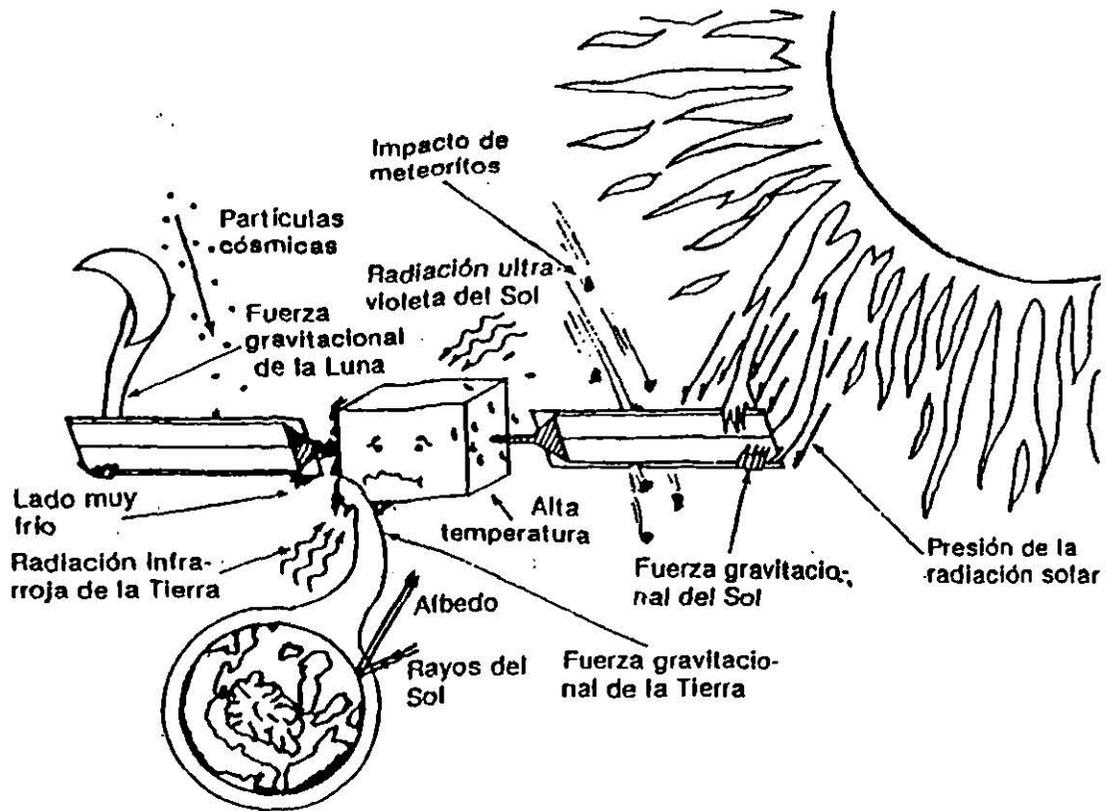
El mecanismo para hacerlo es muy complejo, pues se necesita mantener un balance térmico entre la energía que el satélite recibe por la radiación de fuentes externas y la energía que el mismo disipa internamente. El problema se complica aun más si se considera que la energía de las fuentes externas cambia constantemente conforme el satélite gira alrededor de la tierra ya que según la hora del día y época del año la magnitud de la radiación que recibe del sol y de la tierra es variable. La principal fuente de radiación externa es el sol, y aun cuando causa algunos problemas para conservar el balance térmico en el satélite, es obvio que sin el no sería posible generar electricidad a través de las celdas solares; por supuesto, sin el tampoco habría vida sobre la superficie de la tierra y mucho menos satélites artificiales girando alrededor de ella.

Por un lado, el sol permite generar energía para que el satélite, pero 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 esta orientada hacia el sol se calienta mucho, las partes no iluminadas no 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, esta consiste en radiación infrarroja emitida por ella misma y de la reflexión de los rayos solares sobre su superficie, denominada albedo; sin embargo, el efecto térmico de su radiación total 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 esta 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.

## CAPÍTULO IV

### DESCRIPCIÓN A CUADROS DE UN SATÉLITE

#### EL INTELSAT III.

Si bien hemos escogido el satélite Intelsat III como modelo típico de un satélite de comunicaciones, su diagrama y su descripción son válidos para otros satélites, incluyendo los de modelos diferentes y de más capacidad que los actuales. A lo largo de la explicación se harán los comentarios correspondientes para hacer posible esto.

La señal proviene de la tierra que entra por la antena receptora, puede contener muchos canales de televisión o miles de canales telefónicos de datos, todos ellos enviados en frecuencias diferentes; al rango de frecuencias que hay entre la mas baja y la mas alta de las que se transmiten se les da el nombre de **ancho de banda**.

Un satélite puede usar 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 de información, que posteriormente serán amplificados por separado en distintos transponders. Las antenas tanto transmisoras como receptoras tienen un ancho de banda lo suficientemente grande para poder trabajar en las bandas C y Ku, que son en las que actualmente operan los satélites. En cada una de estas bandas, el ancho de banda de operación es de 500 MHz tanto para transmisión como para recepción.

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 es igual o mayor a 500 MHz con una frecuencia central de 6.175 GHz.

Haciendo referencia a la figura 4.1 estas señales son recibidas por la antena omnidireccional del satélite (antena de monitoreo), pasa por el amplificador a diodo túnel, el convertidor de frecuencia formado por el mezclador y el oscilador local y el tubo de onda progresiva de baja potencia, e insertadas al decodificador de telecomando, a través de un filtro acoplador.

Ahí son procesadas antes de aplicarse el circuito de control que puede ser el encendido del motor de apogeo para corregir la órbita, encender un amplificador a tubo de ondas progresivas, etc.

Haciendo referencia a la misma figura a continuación se delinea el funcionamiento básico de los componentes utilizados en la trayectoria de señal de comunicaciones.

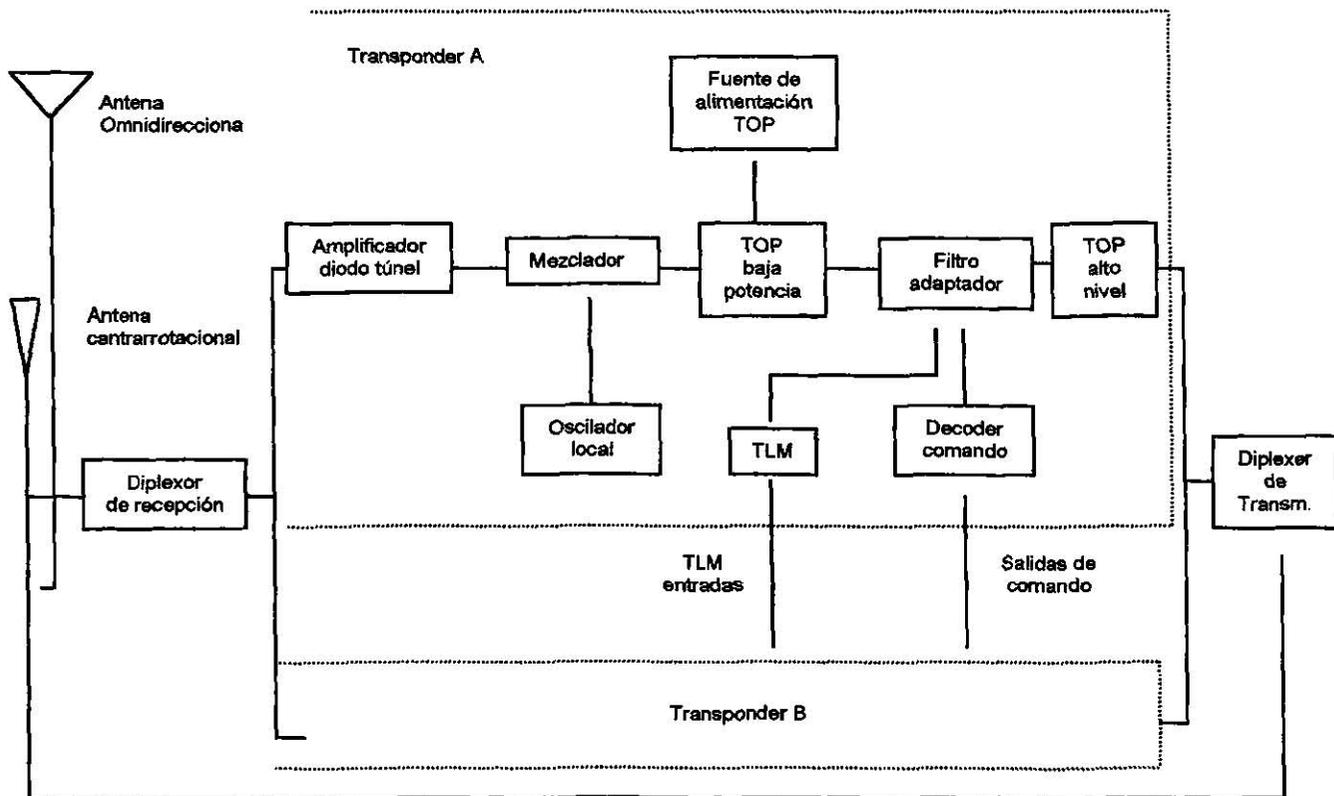


Figura 4.1

#### a) ANTENA.

Las señales de comunicaciones enviadas desde la estación terrena en frecuencia del orden de los 6 GHz., son recibidas por la antena contrarrotacional (este sistema de antena permita mayor estabilidad al satélite) y pasadas al deplexer de recepción.

Debemos aclarar aquí, desde que el satélite Intelsat III fue un satélite de cuerpo cilíndrico estabilizado por giro (semejante a los Morelos mexicanos) lo que frecuentemente obliga a utilizar una antena contrarrotacional, con giro contrario al del satélite para poderla orientar.

Aunque estamos describiendo al Intelsat III, el diagrama es válido, como se mencionó anteriormente, para un satélite cualquiera de los actuales solo con la consideración, en este punto, de que la antena no sería contrarrotacional para un modelo de cuerpo cúbico con aletas donde solo nos referíamos a la antena como "la antena de comunicaciones" para diferenciarla de la del monitoreo (la omnidireccional).

#### b) DIPLEXER DE RECEPCIÓN.

En el diplexer de recepción son separadas las diferentes bandas (o portadoras) de comunicación para ser alimentadas a su respectivo transponder o canal.

#### c) AMPLIFICADOR O DIODO TÚNEL.

Siguiendo la trayectoria de la señal a través del transponder, observamos que esta es amplificada en el amplificador que tiene aproximadamente 31 db de ganancia y una figura de ruido de 4.3 db.

Nuevamente debemos mencionar aquí, que si queremos generalizar el diagrama es conveniente referirnos a este amplificador como un LNA (amplificador de bajo ruido) y considerar que en la mayoría de los satélites modernos se utilizan como dispositivos activos los transistores de efecto de campo de arseniuro de galio o GaAsFET.

#### d) MEZCLADOR.

En esta parte son mezcladas las señales de 6 GHz, para convertirlas en señales de orden de los 4 GHz, (abatidas o transpuestas 2225 MHz en banda C), en esta misma parte se cuenta con filtros que eliminan las señales espurias indeseables, producto de la mezcla, permitiendo el acceso al amplificador de tubo de ondas progresivas (TWT) a las señales útiles de comunicaciones.

En el caso de que la banda utilizada fuera banda Ku el cambio de frecuencias en el mezclador es de 2300 Hz.

En cualquiera de los casos observe que la frecuencia de bajada siempre será menor que la de subida. Esto es así por el hecho de que la señal de bajada esta limitada en cuanto a su potencia por la capacidad de las celdas solares que son la única fuente de energía eléctrica disponible en el satélite y considerando que a mayor frecuencia existen más pérdidas de propagación es preferible seleccionar que las que tenga menores pérdidas (la de menor frecuencia) para la bajada y lograr que llegue a tierra con un mayor nivel de potencia que si se escogiera la de mayor frecuencia.

En el caso de la de mayor subida, el problema no es tan crítico ya que en tierra se dispone de otras fuentes de energía para, previamente compensar las posibles pérdidas.

**d) OSCILADOR LOCAL.**

Genera una oscilación fija de 2225 MHz, que entrega el mezclador para que este haga una conversión de frecuencias.

**f) TUBO DE ONDAS PROGRESIVAS DE BAJA POTENCIA.**

Las señales de comunicaciones son amplificadas en esa parte del equipo.

**g) FILTRO ACOPLADOR.**

Acopla las señales que vienen del tubo de ondas progresivas de baja potencia (TOP o TWT) con las señales que llegan al TLM para transmitir las dándoles acceso al tubo de ondas progresivas de alto nivel.

**h) TUBO DE ONDAS PROGRESIVAS DE ALTA POTENCIA.**

Aquí las señales de comunicación son finalmente amplificadas al nivel adecuado de transmisión.

Nota: Ambos tubos de ondas progresivas pueden ser agrupados en un solo cuadro designado como HPA (amplificador de alta potencia). En algunos sistemas modernos este amplificador está construido con dispositivos de estado sólido.

**i) TLM (TELEMETRÍA).**

Aquí se llevan los aparatos de medición a distancia.

**j) DIPLEXER DE TRANSMISIÓN.**

Las señales de todos los transponders son combinadas para ser alimentadas a la antena de comunicaciones que se encargara de transmitir la información a la tierra.

**k) DECODIFICADOR DE COMANDO.**

Ejecuta las ordenes que le llegan desde tierra para la modificación de algún desperfecto en el transponder.

**l) FUENTE DE ALIMENTACIÓN TOP (TWT).**

Ejecuta las ordenes que le llegan desde tierra para la modificación de algún desperfecto en el transponder.

**m) ANTENA OMNIDIRECCIONAL.**

Se utiliza para el monitoreo desde tierra de los demás satélites y del mismo al momento de lanzarlo.

**RESCATE DE SATÉLITES.**

Considérense que por alguna razón el satélite no hubiese podido llegar a su posición final. ¿Seria posible aprovecharlo aun en esas condiciones, o al menos rescatarlo? La respuesta es afirmativa, los satélite si se pueden rescatar, pero salvo pocas excepciones hay que traerlos de regreso hasta la superficie de la tierra, para revisarlos y volver a intentar llevarlos hasta la órbita geoestacionaria, acoplándole motores nuevos de propulsión propia. Esta operación se llevo a cabo por primera vez hace algunos años, para rescatar los satélites Westar VI de

EE.UU. y Palapa B de Indonesia; para ello se utilizó el orbitador de la NAS, QUE LOS trajo almacenado en su compartimento de carga.

Sin embargo es preciso recordar que los orbitadores vuelan en órbita circular baja a unos trescientos kilómetros de altura sobre el nivel del mar. Como es posible entonces rescatar satélites que se encuentran a la deriva a miles de kilómetros de distancia? La estructura y funcionamiento de las principales partes de un satélite, se hablará de su subsistema de propulsión, diseñado para ser útil durante todos los años previstos para que el satélite funcione. Como los propulsores de este subsistema consumen combustible cada vez que deben ser activados, el satélite lleva en su interior tanques con combustible almacenado para todas estas maniobras que se realizaran a través de varios años.

Retómese ahora el caso de un satélite que no haya logrado llegar a la órbita geoestacionaria, como de hecho ocurrió con el Westar VI y el Palapa B, cuyos motores de perigeo o PAM no permanecieron encendidos durante 80 segundos, sino que se apagaron mucho antes, impidiendo que el satélite alcanzase la altura final deseada. Pocos segundos después del encendido, el PAM se había apagado inexplicablemente, quedando cada satélite en una órbita de unos cuantos miles de kilómetros de altura, mucho mas debajo de la altura geoestacionaria. Era preciso bajarlos de alguna manera hasta la altura en que vuelan los orbitadores, para que los astronautas pudieran salir de la nave a capturarlos y almacenarlos en el compartimento de carga.

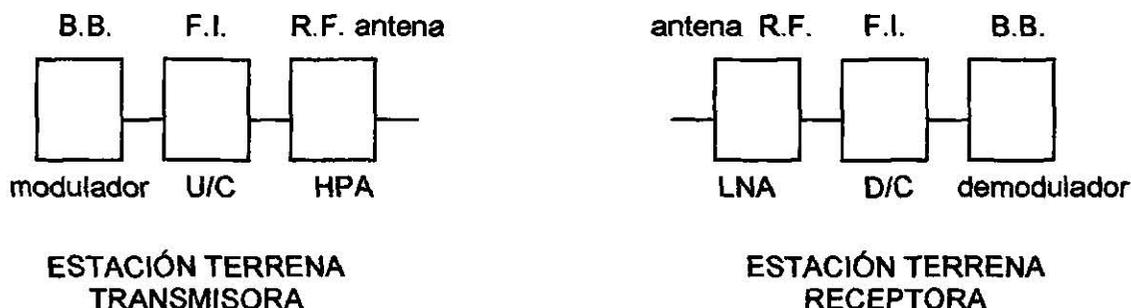
Por lo tanto, el combustible almacenado en cada satélite, que se había previsto para operarlo durante todos su años de vida, se utilizó a través de muchisimas maniobras, para irlos bajando poco a poco, hasta que quedaran al alcance de los orbitadores. No era posible reparar los satélites en el espacio, a menos que se tuviesen los medios para volver a llenar sus tanques de combustible y ponerles un nuevo motor PAM, y hasta la fecha aun no es posible hacerlo. La única alternativa que se tuvo en esa ocasión fue traerlos de regreso a la tierra,

para que las compañías aseguradoras los repararan o vendiesen y recuperaran parte de sus pérdidas económicas.

## CAPÍTULO V

### CIRCUITO HIPOTETICO DE REFERENCIA

Para establecer un sistema de comunicaciones vía satélite, se requiere contar con una estación terrena transmisora, un satélite de radiocomunicaciones y una estación terrena receptora, integrados según la recomendación de CCIR, del **circuito hipotético de referencia**, como a continuación se describe.



#### Estación terrena transmisora.

- Acometida de la señal a transmitir. (Entrada de banda base).
- Modulador.
- Convertidor de la subida (U/C, up converter).
- Amplificador de potencia (HPA, high power amp).
- Antena, lado de transmisión.

La señal de información (telefonía, televisión, información digital, etc.), es recibida por el equipo transmisor del satélite en tierra una vez que, previamente es agrupada adecuadamente mediante la multiplexión en la forma de la señal de banda base (BB), para ser alimentada al modulador. Este modulador opera a una frecuencia estándar de 70 MHz, llamada frecuencia intermedia (F:I) la cual es modulada en frecuencia por la banda base. La señal de F:I (modulada), es posteriormente elevada al rango de microondas (Ejemplo: 6 GHz en banda C), en el convertidor de subida para luego ser amplificada en HPA con la finalidad de

conseguir el suficiente nivel para que la señal llegue al satélite con la potencia suficiente.

La señal de microondas es alimentada a la antena la que concentra la energía dirigiéndola hacia el satélite.

### **Satélite de radiocomunicaciones.**

- Antena lado de recepción.
- Amplificadores de bajo nivel de ruido (LNA).
- Convertidor de frecuencia (trasladar de banda).
- Amplificador de potencia (HPA).
- Antena lado de transmisión.

Al llegar la señal al satélite, es captada por la antena de recepción la cual la alimenta a un amplificador de bajo nivel de ruido (LNA) el cual amplifica la microonda para luego, en el convertidor, bajar su frecuencia al rango de la banda "Down Link" (Ejemplos: al rango de 4 GHz en banda C). Una vez trasladada la frecuencia, la señal será amplificada en HPA y enviada de nuevo hacia la tierra por la antena de transmisión. Esta antena en ocasiones, es la misma que la de recepción.

### **Estación terrena receptora.**

- Antena del lado de recepción.
- Amplificador de bajo nivel de ruido.
- Convertidor de bajada (D/C down converter).
- Demodulador.
- Entrega de la señal de banda base.

En la estación terrena receptora la señal es recogida por la antena, alimentada al LNA donde se amplifica con un bajo nivel de ruido, alimentada al convertidor de bajada donde la señal es convertida del rango de microondas a frecuencia intermedia (79 MHz), para luego ser recuperada la información en el demodulador. La señal a la salida del demodulador es la información en la forma de Banda Base.

### **Enlaces radioelectricos por satélite.**

Los circuitos hipotéticos de referencia se componen de los enlaces radioelectricos por satélite. La configuración de estos enlaces, se muestra en la figura anterior y los términos usados se definen como sigue:

#### **a) Acceso al Satélite.**

Es el método de combinar en el repetidor del satélite de comunicaciones las señales de cada estación terrena.

#### **b) Enlace RF.**

El enlace RF es el que se extiende de la salida del convertidor ascendente de la estación terrena hasta la entrada del convertidor descendente de una o varias estaciones terrenas receptoras.

#### **c) Enlace FI.**

Para las transmisiones multiplexadas por división de frecuencia y moduladas en frecuencia (FDM/FM) de telefonía y las de FM en vídeo, el enlace de FI se extiende de la salida del modulador de la estación terrena transmisora hasta la entrada del demodulador de una o varias estaciones receptoras.

**d) Enlace por satélite.**

Para las transmisiones de vídeo y telefonía, el enlace por satélite se extiende de la entrada de la banda base de equipo de radio en la estación terrena transmisora hasta la salida de la banda base del equipo de radio de la estación terrena receptora.

**e) Banda Base.**

El término banda base incluye la banda de frecuencias desde 0 Hz hasta la frecuencia superior, la cual es la frecuencia de modulación mas alta para la portadora que utiliza.

## CAPÍTULO VI

# SUBSISTEMAS DE UN SATÉLITE Y SUS PRINCIPALES FUNCIONES

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 Tabla 6.1.

| Subsistema                      | Función   |
|---------------------------------|---|
| 1 Antenas                       | Recibir y transmitir señales de radio frecuencia  |
| 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  |

Tabla 6.1. Principales subsistemas de un satélite y sus funciones.

### SUBSISTEMAS DE ANTENAS.

Las antenas reciben las señales de radiofrecuencia provenientes de las estaciones terrenas transmisoras, y después de que son procesadas (este

proceso se limita fundamentalmente o amplificación y conversión de frecuencia, y le corresponde al subsistema de comunicaciones el cual se expone más adelante) 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. 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 interface 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.

Paradójicamente, una antena parabólica chica puede recibir y transmitir dentro de una extensión territorial muy grande, mientras que una antena de mayor tamaño, que opere a 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 de la terrestre; ¿Para qué gastar en tanto material y tener que vencer complicaciones de volumen y peso en el sistema de lanzamiento que lleve al satélite al espacio? 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; esto facilita el diseño y reduce el costo de las estaciones terrenas receptoras, por otra parte, cuanto más alta sea la frecuencia a la que una antena de dimensiones constantes trabaje, mayor es su capacidad de concentración de energía; ésta es una característica propia de las antenas parabólicas y, en general, de todas las antenas llamadas "de apertura" (Las antenas de corneta, parabólicas simples y Cassegrain caen dentro de esta categoría), 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 de la frecuencia de operación, o sea, es el número de longitudes de onda 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.

Hay satélites que tienen varias antenas de características distintas, con finalidades diferentes. Por ejemplo, el satélite de comunicaciones internacionales Intelsat V, tiene ocho antenas para cubrir una vasta extensión territorial e intercomunicarla eficientemente al menor costo posible. De esas ocho antenas, dos son globales, dos hemisféricas, dos de zona y dos puntuales. Las primeras dos son antenas de tipo corneta y cubren la mayor cantidad posible de la superficie terrestre que puede verse desde la posición del satélite; es decir, puede recibir desde cualquier estación transmisora que se encuentre dentro de los límites de esa zona y pueden transmitir también hacia cualquier estación receptora que se halle dentro del mismo contorno. Las otras seis antenas sí son parabólicas. Las zonas más pequeñas son las cubiertas por las antenas de cobertura puntual,

que reciben este nombre precisamente porque concentran su potencia casi en un punto, en relación con las dimensiones del planeta; los haces de iluminación de éstas antenas, por ser tan angostos, reciben el nombre de haces pincel o puntuales.

La cobertura de un haz es denominada *huella de iluminación*; en algunos casos ésta está limitada por un contorno muy irregular. La irregularidad de estos contornos está hecha a propósito por los diseñadores de las antenas del satélite, aunque es mucho más sencillo construir una antena cuya huella de iluminación sea un círculo o una elipse; de esta forma no se desperdicia potencia transmitiéndola a puntos geográficos en los que no hay tráfico o estaciones terrenas transmisoras y receptoras, y en cambio se aprovecha mejor concentrándola para que ilumine sólo los lugares geográficos en los que sí hay densidades importantes de población, equipos y gran demanda de servicios de comunicación. Como las huellas de iluminación tienen ciertos contornos, al haz que irradia cada una de estas antenas también se le llama *haz de contorno*, independientemente de la extensión territorial que abarque.

La huella de iluminación es la intersección de haz radiado por la antena con la superficie de la Tierra. Imagínese una persona que tiene una lámpara de mano que en lugar de proyectar un círculo sobre una pared, o bien una elipse al inclinar la lámpara, proyecta una mancha irregular de luz, por ejemplo, el perfil de una papa. Imagínese ahora un globo gigante transparente e ilumínelo con la 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 tienen de una parte de la superficie curva del globo.

Hasta ahora solo se ha hecho referencia a las antenas del satélite cuya función es intercomunicar distintos puntos geográficos, es decir; recibir y transmitir las señales de conversaciones telefónicas, programas de televisión o información digital de empresas, bancos, etc.; pero existe otro tipo de antena muy importante,

que no tiene nada que ver con la recepción y transmisión de las señales anteriores. Se trata de la antena de telemetría y comando, encargada de recibir las señales que contienen ordenes emitidas por el centro de control en la Tierra, para que se efectúe alguna corrección a bordo; también es responsable de enviarle al centro de control señales que contienen información vital sobre el estado de operación de todo el satélite, con el fin de que en la Tierra se pueda saber que ocurre en su interior, dónde esta y como está funcionando en general; de esta manera, sus propietarios u operadores puedan 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 éstas últimas son altamente direccionales (Una antena direccional concentra la mayor parte de su potencia radiada en un haz angosto de iluminación, es decir, en cierta dirección); normalmente es una antena bicónica, cuya radiación es casi omnidireccional, es decir, que emite más o menos con la misma intensidad de todas direcciones; de ésta 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; en la práctica y en condiciones normales de operación, se prefiere usar las antenas parabólicas del satélite para la transmisión y recepción de señales de telemetría y comando. La antena propia de telemetría y comando juega su principal papel durante el lanzamiento y colocación en órbita del satélite, y por supuesto en cualquier caso imprevisto.

## **SUBSISTEMA DE COMUNICACIONES.**

### **Conceptos Generales.**

Las señales de comunicaciones (telefonía, televisión e información digital) recibidas por el satélite entran a el a través de sus antenas, y ellas mismas se encargan de transmitir toda esta 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 éstas funciones mediante filtros, amplificadores, convertidores de frecuencia, conmutadores y multiplexores.

El diagrama de la Figura 6.1 muestra la relación entre las antenas y el equipo de comunicaciones. Para mayor sencillez, en el solamente se ilustra una de las posibles trayectorias o cadenas de los equipos que hay en el subsistema de comunicaciones; es normal que algunos de estos equipos se instalen repetidos, o sea, que sean redundantes, para que en el caso que uno de ellos se descomponga, exista aún la posibilidad de tener una trayectoria ininterrumpida entre las antenas recepción y transmisión; para efectuar el cambio se cuenta con conmutadores que hacen la conexión de un elemento a otro. A la trayectoria completa de cada repetidor comprendido 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 transponders, y su número depende del diseño del satélite.

En realidad, cada cadena es más compleja que lo que se muestra en el diagrama, además de que pueda haber ligeras variantes en las etapas de amplificación y conversión de frecuencia, pero lo que se ha incluido por el momento es suficiente para explicar a grandes rasgos cual es su función. Este subsistema, incluyendo el de las antenas, es el de mayor interés para los ingenieros en comunicaciones cuya responsabilidad es planificar el uso del satélite, es decir, asignar las trayectorias o transpondedores en los que deben de ir los diferentes servicios, como los canales de televisión, telefonía y datos, con sus correspondientes niveles de potencia, así como el espacio (por espacio, se entiende el porcentaje de la potencia total del amplificador y el porcentaje de su

ancho de banda que son usados por cada señal) que deban ocupar dentro de cada amplificador.

La señal proveniente de la Tierra que entra por la antena receptora puede contener muchos canales de televisión, o miles de canales telefónicos o de datos, todos ellos enviados en frecuencias diferentes, al rango de frecuencia 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 el ancho de banda de un equipo, este será 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 de otro cuyo ancho de banda de operación sea menor.

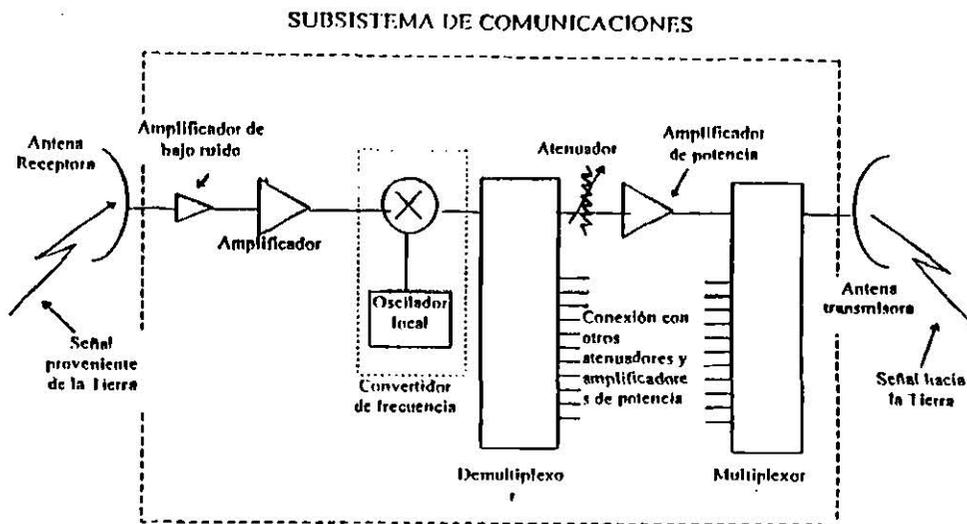


Figura 6.1. Relación entre los subsistemas de antenas y comunicaciones.

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. Es decir, las

antenas receptoras, y lo mismo se aplica a 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, 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 500 Mhz, con una frecuencia central de 6.175 Ghz. Los transpondedores, entre otras funciones, cambian las frecuencias de todas las señales contenidas en ese rango, bajándolas a otro 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 6/4 Ghz, indicando que la señal sube al satélite con frecuencias cercanas a los 6 Ghz y que baja con frecuencia cercanas a los 4 Ghz. En la banda "Ku", el proceso de recepción, conversión de frecuencias y transmisión es similar al de la banda "C", sólo que las frecuencias Tierra-satélite están entre 11.7 y 12.2 Ghz; en este caso, el enlace se representa con la nomenclatura 14/12 Ghz.

En los satélites híbridos, los procesos descritos para las bandas "C" y "Ku" se llevan a cabo simultáneamente, a través de sus amplificadores y demás equipos correspondientes; estos equipos están contenidos en secciones separadas del subsistema de comunicaciones, puesto que unos están diseñados para trabajar en la banda "C" y otros para hacerlo en la banda "Ku". Es fácil incluir que éstos

satélites, por el hecho de duplicar su capacidad de trabajo, requieren más energía eléctrica, y en consecuencia necesitan más metros cuadrados de celdas solares para efectuar la conversión suficiente de energía solar en electricidad.

Considérese ahora una trayectoria completa del subsistema de comunicaciones de la Figura 6.1, desde que la señal entra al satélite hasta que sale de él, suponiendo que se está transmitiendo un canal de televisión en la banda "C" y en el transpondedor número 4; el canal de televisión puede contener, por ejemplo, una película o un partido de fútbol, y no implica necesariamente que se trate del canal 4 de alguna organización televisora, pues bien puede ser el canal comercial de televisión 6 o 13, o cualquier otro. Simplemente, ese canal está manejándose a través del transpondedor número 4 del satélite. ¿Cómo se enumeran los transpondedores? Recuérdese que el ancho de banda de un satélite usual es de 500 Mhz en total. Cuando un canal de televisión se transmite por satélite, al modularlo en frecuencia ocupa 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 Figura 6.2 se muestra una división usual del ancho de banda de un satélite en 12 ranuras o espacios iguales de 36 Mhz de ancho de banda cada uno. 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, pero éstos son otros casos especiales que no se tratarán por el momento.

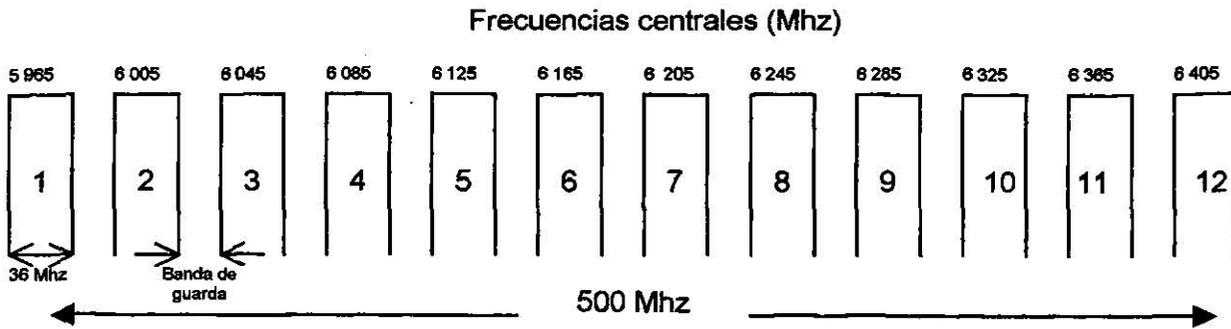


Figura 6.2. Ancho de banda de un satélite que opera en banda "C", dividido en ranuras de frecuencias de 36 Mhz cada una. Cada ranura corresponde a las frecuencias de trabajo de un transpondedor, y las frecuencias centrales que se indican son las que se usan para transmitir de la tierra al satélite. Para 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.

De acuerdo con la Figura 6.2. la frecuencia central del transpondedor número 4 es de 6.085 Ghz, o sea, que ésta es la frecuencia central con la que se estaría enviando el canal de televisión, con la película o el partido de fútbol, de la Tierra hacia el satélite.

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 seis o siete canales de televisión, miles de canales telefónicos y algunos canales de datos. Para la antena esto no representa ninguna dificultad, pero no es fácil construir aparatos electrónicos de alta potencia que realicen sus funciones de amplificación óptimamente con todas esas señales al mismo tiempo, aun cuando sí sea posible, la vulnerabilidad del conjunto de comunicaciones aumentaría frente a posibles fallas, al estar todo concentrado en una sola unidad; además, el ruido de intermodulación también aumentaría y siempre estaría presente en todos los casos de operación. Por lo tanto, es necesario aislarlas, para procesarlas y amplificarlas por separado, y ésta es una de las razones principales por la 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.

Tal como se muestra en la Figura 6.1, el primer dispositivo electrónico importante que encuentran las señales recibidas por la antena es un *amplificador de bajo ruido* (a este dispositivo también se le denomina preamplificador de bajo ruido, porque después de él hay otras etapas de amplificación), con poca potencia de salida; este aparato genera internamente muy poco ruido, que se suma a las señales originales que entran en él para amplificación. Todos los dispositivos electrónicos generan ruido, principalmente por su calentamiento; este término se emplea para identificar a las señales nuevas, de diversas frecuencias, que son generadas interna e indeseablemente por el aparato. Si estas nuevas señales, ajenas a la información original, son muy grandes o intensas, entonces al sumarse con la segunda pueden alterar su contenido. 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 superficie de la Tierra, su nivel de potencia de llegada al satélite es muy bajo. 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.

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. Es un dispositivo clave, de cuyo correcto funcionamiento depende que la información siga fluyendo o no dentro del satélite, y por lo tanto se debe contar con un duplicado; es decir, 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 al otro que si esté en buenas condiciones. Después de que todas las señales han sido amplificadas

casi fielmente, puesto que muy poca potencia de ruido se les ha sumado, 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, pero su efecto ya no será tan problemático como hubiese podido serlo en la primera etapa de amplificación, porque ahora están vigorizadas con un nivel de potencia tal que las hace menos vulnerables.

Hasta este momento, lo único que se ha hecho es aumentar ligeramente el nivel de potencia de las 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. Después de amplificar y cambiar la frecuencia de las señales, el siguiente paso es separarlas en grupos o bloques; cada grupo puede contener un solo canal de televisión o dos, cientos de canales telefónicos, un paquete de información digital de alta velocidad, o alguna otra variante. 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 de 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 tal como se indica.

En la misma figura 6.1 se observa que después de cada salida del demultiplexor hay un atenuador o resistencia variable; esta 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 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, como sucede con un aparato de radio casero al que se le sube o baja el volumen girando una perilla. Sin embargo, si se toma en cuenta que la potencia de las señales transmitidas llega muy baja al satélite, y que éste tiene una capacidad limitada de amplificación, aparentemente no es lógico atenuarlas antes de amplificarlas.

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 posible, se dice que están operando en su punto de saturación; para que esto ocurra, la potencia total de las señales que entran a ellos debe tener un valor determinado (véase la figura 6.4). Sin embargo, no siempre es necesariamente deseable obtener a la salida de un amplificador de potencia la máxima posible, es decir, operarlo en saturación, pues como se explica más adelante, todo depende de la clase de información que contenga el bloque que se va a amplificar. Por otra parte, cuanto mayor sea la intensidad de las señales que llegan al satélite se obtienen mejores resultados en la primera etapa de amplificación (amplificador de bajo ruido), ya que la relación entre la potencia de la señal amplificada y la potencia del 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. Sin embargo, el alto nivel de las señales amplificadas en esta primera etapa, que se convierte en la entrada a los amplificadores de potencia, en general puede ser demasiado; en estas circunstancias, conviene reducir el nivel de las señales con un atenuador variable compuesto por varios atenuadores fijos en serie- antes de alimentar a cada amplificador de potencia.

Todo tipo de información que se transmite al satélite tiene una frecuencia asignada, denominada portadora (La Portadora es una señal senoidal de muy alta frecuencia que es modulada por la información que se desea transmitir o portar

sobre ella. Este proceso es necesario para efectos de transmisión y para la ubicación de cada bloque de información dentro del espectro radioeléctrico, de tal forma que no se traslapen entre sí); 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 a 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 de baja velocidad, requiere tener su propia frecuencia portadora. En la figura 6.3 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; cada señal contiene 192 canales telefónicos agrupados y proviene de una ciudad distinta.

Para 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 alineal (Figura 6.4), se producirán internamente muchas señales adicionales e indeseables que a la salida se sumarían a la información original, distorcionándola. Estas señales indeseables se denominan en conjunto ruido de intermodulación, y su intensidad es cada vez mayor, y más dañina, 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 se tenga que sacrificar potencia de salida. Los atenuadores o resistencias variables descritos anteriormente permiten regular la intensidad de las portadoras y entregar menos o mas potencia a la entrada del amplificador (la potencia total de entrada al amplificador es la suma de las potencias de las portadoras), para que a su vez

salga de él menos o más amplificación de potencia, con un nivel aceptable de ruido de intermodulación (véase nuevamente la figura 6.4).

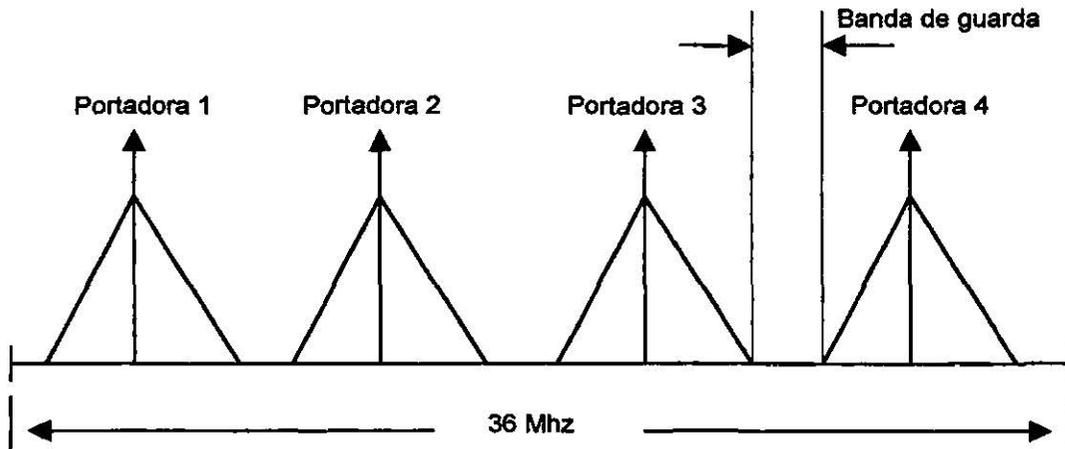


Figura 6.3. Esta sería una posible configuración de la ocupación del espacio de frecuencias de un transpondedor de 36 Mhz. Cada triángulo representa una señal de telefonía que contiene 132 canales telefónicos individuales y tiene asignada su propia frecuencia portadora. La banda de guarda entre señales adyacentes se deja para reducir la interferencia entre ambas, y su ancho siempre es función del tipo de señales que vayan a sus lados.

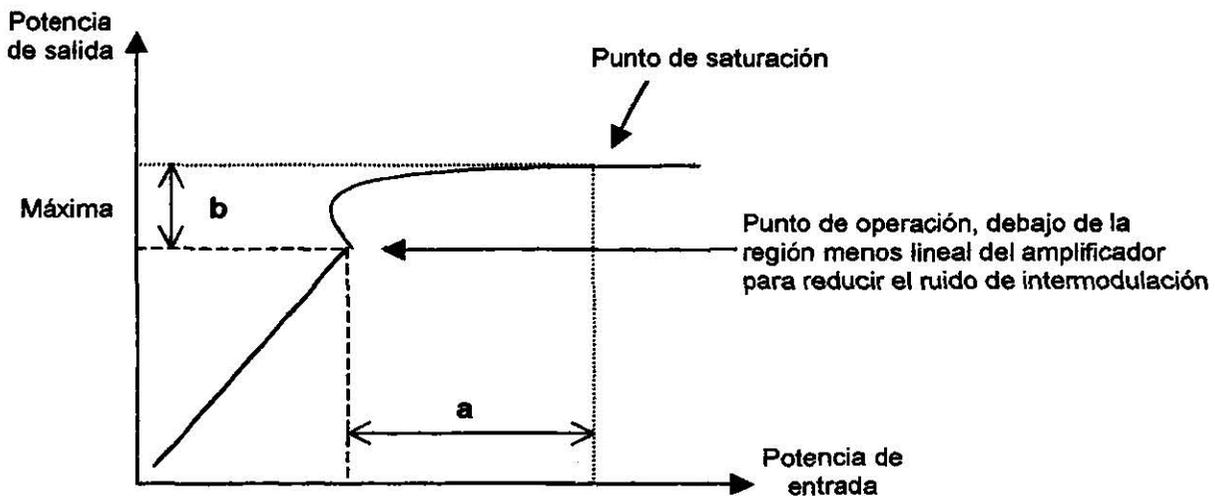


Figura 6.4. Curva característica alinear de entrada-salida de un amplificador de potencia; **a** es la reducción necesaria de la potencia de entrada respecto al valor que satura al amplificador, para poder trabajar en el punto de operación, y **b** es la reducción que se obtiene en la potencia de salida respecto a la potencia máxima que se obtendría en saturación.

Siempre que haya más de una portadora presente al mismo tiempo en el amplificador de potencia, se produce ruido de intermodulación y cuanto mayor sea su número mayor es el ruido y su efecto sobre la información original: por lo tanto, mientras más portadoras se quieran amplificar con el mismo dispositivo al mismo tiempo, será preciso operar en un punto cada vez más bajo del de saturación, y será menor la cantidad de potencia que se pueda aprovechar a la salida. Este problema del ruido de intermodulación también se tiene en los amplificadores de potencia de las estaciones terrenas transmisoras.

El diagrama de bloques de la figura 6.1 es muy básico, y puede haber distintas versiones, con ligeras modificaciones como las que se muestran en la Figura 6.5. En ella se observa que ya no hay solamente un demultiplexor y un multiplexor, sino 2 de cada uno, con una capacidad igual a la mitad de la que tienen los de la figura 6.1 la potencia de la señal combinada de 500 Mhz de ancho de banda que sale del convertidor de frecuencia se divide en dos y cada parte resultante entra a uno de los demultiplexores; por medio de filtros, el demultiplexor 1 solo permite el paso a los canales impares, y el demultiplexor 2 hace lo mismo con los canales pares; cada uno de estos canales impares o pares tiene un ancho de banda standard de 36 Mhz, aunque también puede haber otros variantes dependiendo nuevamente del tipo y uso del satélite de que se trate.

Los canales impares que pasan por el demultiplexor 1 serían los bloques de información contenidos en las ranuras 1, 3, 5, 7, 9 y 11 de la figura 6.2 y los que pasan por el número 2 serían los que contienen la información de las ranuras 2, 4, 6, 8, 10 y 12 indicadas en la misma figura. Este tipo de separación de canales ofrece una ventaja importante con respecto al uso de un solo demultiplexor, ya que la banda de guarda entre los nuevos canales adyacentes se incrementa y por lo tanto se reduce la posibilidad de interferencia entre ellos durante la etapa de alta amplificación. Después de que cada uno de los canales de 36 Mhz ha sido amplificado por separado, con su correspondiente reducción de potencia a la salida respecto a la saturación, según el caso, los canales impares se vuelven a

juntar mediante el multiplexor 1, que tiene 6 entradas y 1 salida y los canales pares son tratados igualmente por el multiplexor 2, como se ve en la figura 6.5, posteriormente, los dos grupos pasan por un sumador de potencias, y el conjunto, ya de nuevo con un ancho de banda total de 500 Mhz, entra a la antena parabólica transmisora. Los niveles de interferencias se reducen aún más si se cambia la polarización de las señales antes de retransmitirlas; por ejemplo, las señales que llegan al satélite con polarización vertical son regresadas hacia la tierra con polarización horizontal y viceversa.

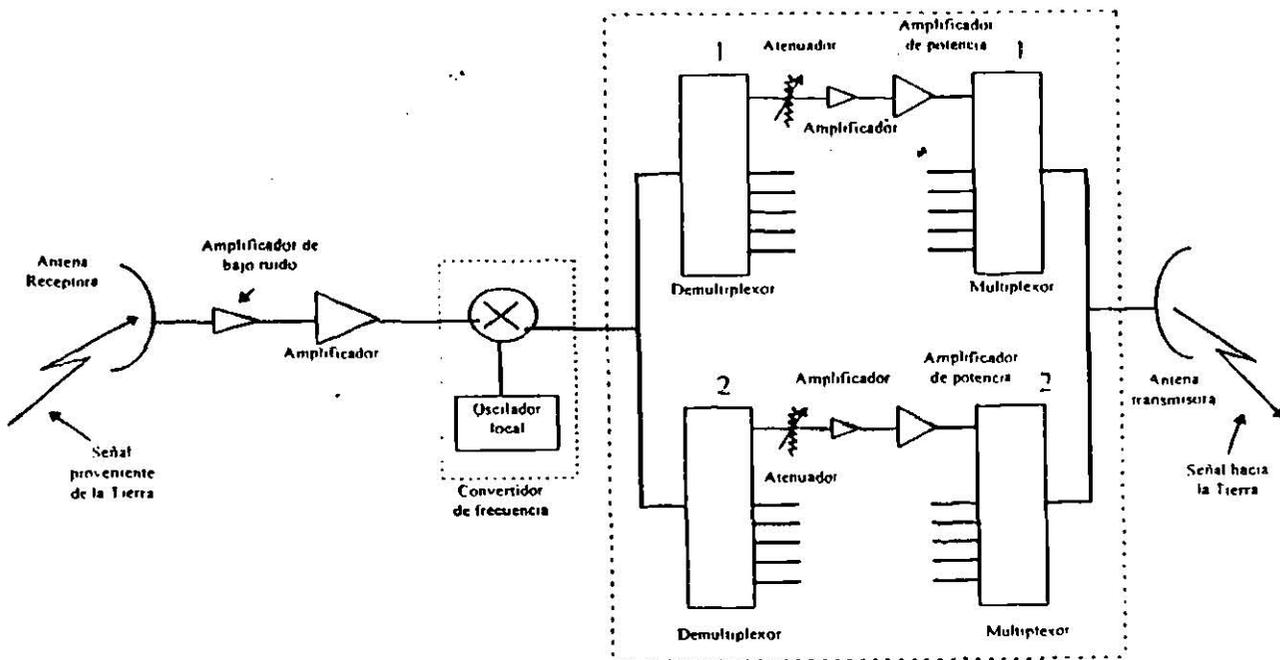


Figura 6.5. Versión modificada del diagrama y equipos del subsistema de comunicaciones. A diferencia del anterior, se utilizan 2 demultiplexores y 2 multiplexores para procesar por separado los canales pares e impares y reducir la interferencia.

En la figura 6.6 se muestra el plan de frecuencias y polarización de un satélite Spacenet. El satélite es híbrido; tiene 12 transpondedores angostos de 36 Mhz y 6 anchos de 72 Mhz en la banda "C", así como transpondedores de 72 Mhz en la banda "Ku". Las señales de los transpondedores angostos de banda "C" son transmitidas hacia el satélite con polarización vertical y retransmitidas hacia la

tierra con polarización horizontal; para los transpondedores anchos de banda "C" se usa polarización horizontal en el enlace de subida y vertical en el de bajada; y en cuanto a los transpondedores en la banda "Ku", las señales suben al satélite con polarización vertical y bajan con polarización horizontal.

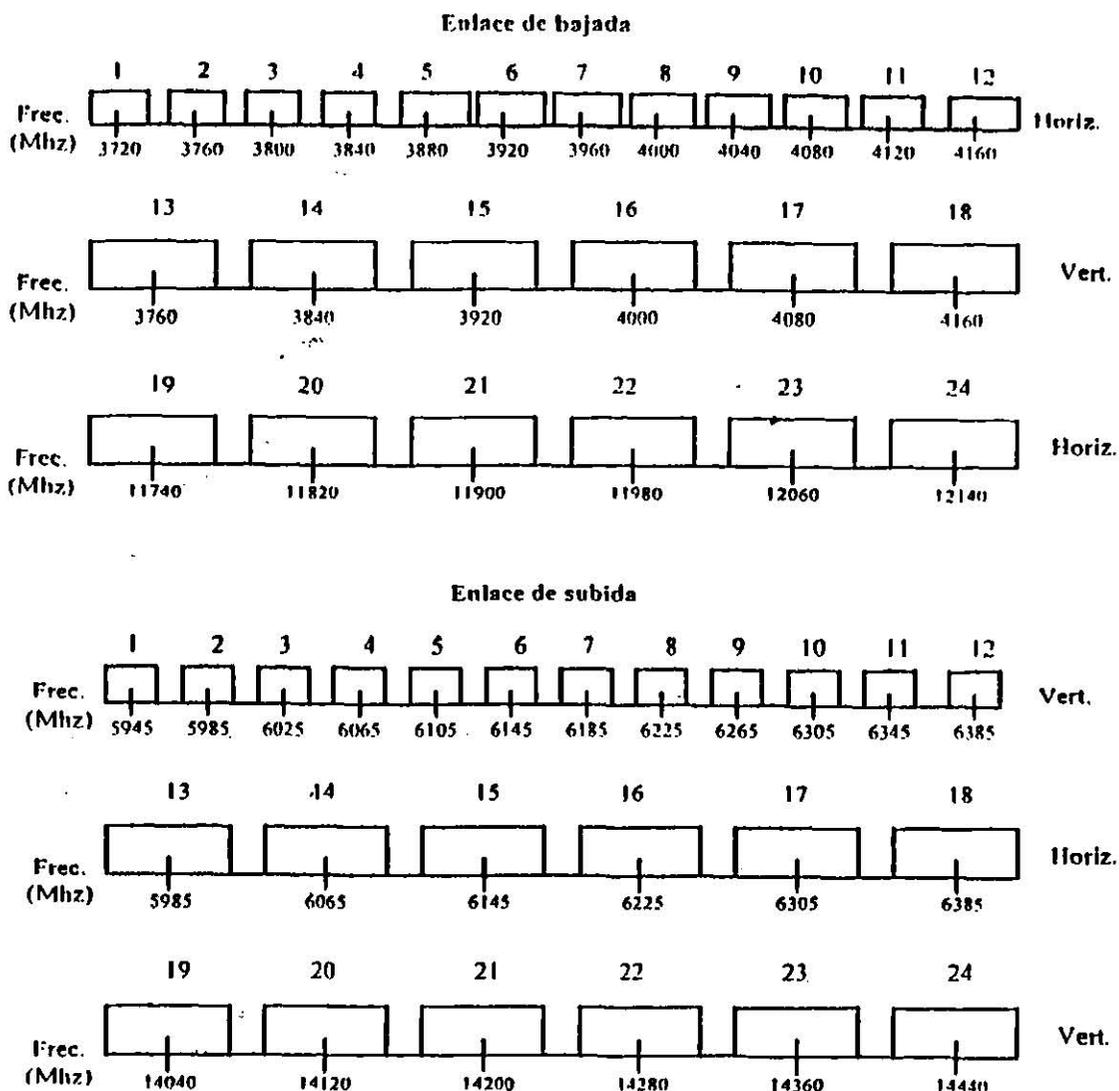


Figura 6.6. Plan de frecuencias y de polarización de un satélite Spacenet.

Hasta aquí se ha hecho referencia a un conjunto de señales de información que provienen de la tierra, ocupan un ancho de banda total de 500 Mhz, son procesadas por el subsistema de comunicaciones de satélite, y finalmente se retransmiten. Estas señales provienen de diversos lugares geográficos y llegan

simultáneamente. Por ejemplo, podría tenerse una red de estaciones terrenas enlazada al satélite, en donde cada estación está ubicada en una ciudad o población diferente; como la de la figura 6.7. En esta red, las ciudades A, B y C transmiten televisión y telefonía multicanal, la D transmite un canal digital de muy alta velocidad (2 Mbps) que debe ser recibido en muchas otras ciudades sin necesidad de que éstas le respondan, las E, F y G transmiten programas estereofónicos de radio, y las restantes (de la H a la Z), envían canales digitales de baja velocidad (9 600 a 56 000 bps) con destino a B, en donde se concentra toda esa información para procesarla en un centro de cómputo; adicionalmente, otras estaciones también transmiten.

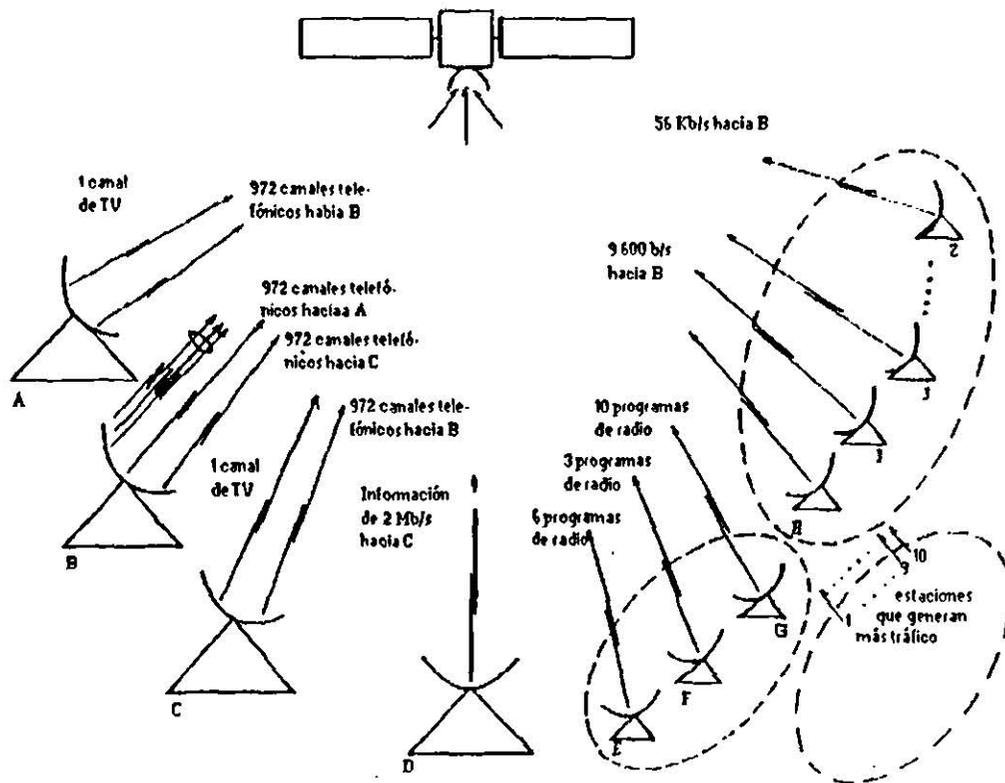


Figura 6.7. Ejemplo de una red de estaciones terrenas enlazadas con un satélite. El ancho de banda total ocupado por todas las señales transmitidas es de 500 Mhz.

Con base en el ejemplo anterior, se puede diferenciar entre tres tipos de enlaces: punto-punto, punto-multipunto y multipunto-punto. El primero une solo a dos puntos geográficos, por ejemplo, cuando se tiene una conversación telefónica, en cuyo caso el enlace 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 unidireccional, en forma de estrella. El tercero es el caso inverso al anterior, en donde en vez de diseminar una información en muchos puntos, se desea concentrarla o recolectarla de éstos en un solo punto específico.

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, de la cual hay tres tipos: por división en frecuencia, por división en el tiempo, y por diferenciación de código; de éstos, el primero es el más común de la actualidad.

## **SUBSISTEMAS 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 los 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; éste 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.

Con excepción de las primeras horas inmediatas a su lanzamiento, en donde la electricidad necesaria es suministrada por baterías, 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 como el curio-244 y el plutonio, aun 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, como el estroncio-90, son peligrosos y pueden implicar un grave riesgo en perjuicio del medio ambiente. Sólo las sondas interplanetarias 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 15 al 20%, pues también aprovechan gran parte de la energía radiada por el Sol en la región ultravioleta de su espectro. Aún así, esta eficiencia sigue siendo muy baja, y es probable que en los próximos años el silicio con el que están hechas las celdas sea sustituido por arseniuro de galio, ya que experimentalmente se ha demostrado que este último material ofrece una eficiencia de aproximadamente 18%. Con arseniuro de galio se puede obtener un determinado voltaje usando menos celdas conectadas en serie que el número que se requiere cuando se emplean celdas de silicio; 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 en 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 estén expuestas las celdas solares; cuanto más baja sea ésta, mayor será el nivel de voltaje entregado por las celdas. Cuando el satélite se encuentra a la distancia de una unidad astronómica del Sol. Una unidad astronómica (1 UA) es la longitud del semieje mayor de la órbita elíptica de la Tierra alrededor del Sol, aproximadamente igual a cinco cincuenta millones de kilómetros. La intensidad de la radiación solar sobre sus celdas es de 1 350 watts por cada metro cuadrado de superficie. Si se toma en cuenta que la eficiencia promedio de conversión de electricidad es del 10%, y que un satélite estándar requiere alrededor de un kilowatt de potencia, es evidente que necesita contar con muchos metros cuadrados de celdas solares. Cada celda solar tiene un área de unos 5 cm<sup>2</sup>, y uniendo muchas de ellas en serie y paralelo (Figura 6.8) se forma un arreglo solar. 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, 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 éste se acerca o aleja del Sol junto con la Tierra al desplazarse alrededor de él, completando una vuelta en un año; cuando el satélite y la tierra se acercan al sol, la intensidad de la radiación solar sobre las celdas aumenta. Además, hay que tomar en consideración que el eje de rotación de la tierra está inclinado con respecto a la elíptica, y que por lo tanto el ángulo de incidencia de los rayos del sol sobre la tierra - y sobre la superficie del satélite - cambia según la época del año, conforme ambos orbitan a su alrededor, creándose un movimiento aparente del Sol con respecto a la Tierra y al satélite. Cuanto mayor sea la desviación del ángulo de incidencia de los rayos solares con respecto a una incidencia normal (perpendicular) de referencia, menor es la conversión a energía eléctrica. En resumen, ambos efectos - 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 máxima durante los equinoccios y mínima en los solsticios.

Como se ve más adelante en la sección de subsistemas de posición y orientación, existen dos formas de mantener a los satélites geoestacionarios relativamente estables en lo que concierne a su orientación con respecto a la tierra, a pesar de los efectos mecánicos producidos por las fuerzas perturbadoras. Estas dos formas son la estabilización por giro y la estabilización triaxial con cuerpo fijo. Los satélites estabilizados por giro son cilíndricos y llevan las celdas montadas sobre la mayor parte de su superficie, envolviendo casi totalmente su perímetro. En cambio, los satélites con cuerpo fijo y estabilización triaxial no tienen una geometría cilíndrica, sino que se asemeja a un cubo o caja, y normalmente emergen dos largos y planos paneles solares de sus costados, en forma de alas. Esta configuración se asemeja a un ave suspendida en el espacio con las alas extendidas, por lo que es común referirse a un satélite como "pájaro electrónico".

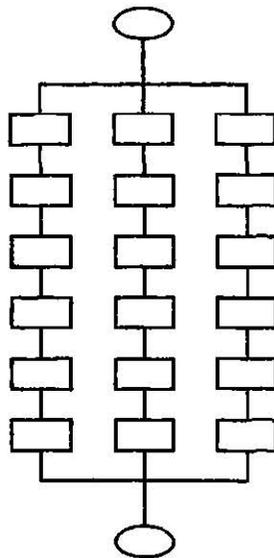


Figura 6.8. Ejemplo de una conexión de celdas solares en serie y paralelo.

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 al 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 interior 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 óptimamente 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. Por tal razón, los satélites con este tipo de estabilización brindan mayor capacidad de generación de energía eléctrica que la de los estabilizados por rotación, invariablemente se opta por ellos cuando los requerimientos de potencia lo exigen; tal es el caso de los satélites de radiodifusión directa de televisión, que necesitan varios kilowatts de potencia para operar eficaz y económicamente.

Con base en lo anterior, es razonable preguntarse porque se usan los satélites estabilizados por giro; hay varias razones para hacerlo en algunos casos. La disponibilidad de contar con más energía eléctrica en un satélite de estabilización triaxial es desde luego muy atractiva, pero hay ciertas desventajas que deben considerarse antes de tomar una decisión. Por un lado existe el grave riesgo de que poco después de colocar el satélite en órbita sus paneles solares - que van replegados en el momento de lanzamiento - no se extiendan o que no puedan ser reorientados, por la falla de algún mecanismo. Problemas como éste ya han ocurrido en algunas ocasiones, por ejemplo, con satélites de la India y de la liga de países Arabes. Aunado a esto, los diseños del subsistema de control térmico y la parte de inyección de combustible del subsistema de propulsión son más sencillos en un satélite estabilizado por giro que en uno de estabilización triaxial. Por esta razón no podemos concluir que tipo de satélites sean mejor que otro.

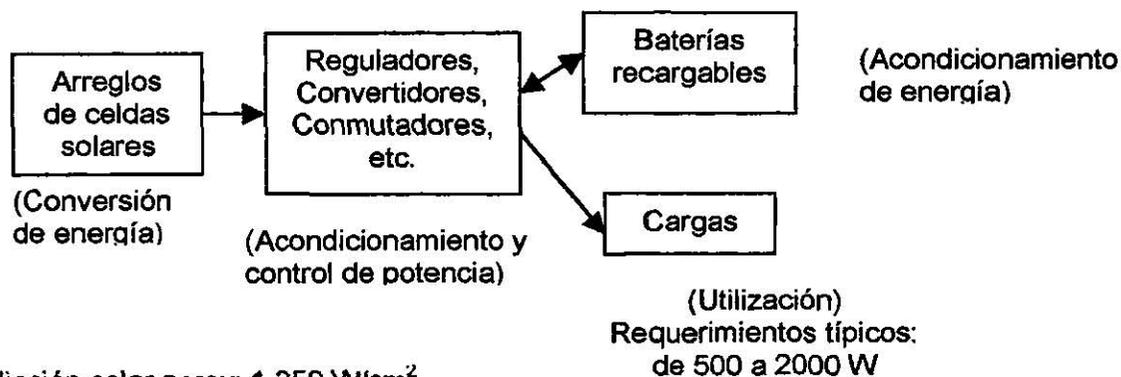
Durante toda su vida de operación, el satélite se ve expuesto a eclipses, y en estos casos necesita obtener su energía eléctrica de alguna otra fuente que no sea el Sol para poder seguir funcionando; esta fuente secundaria o de respaldo la constituye un conjunto de baterías, que se cargan cuando las 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 relevadores eléctricos detectan la disminución en el nivel de la 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.

Cuando ha transcurrido precisamente la mitad de cada uno de los eclipses, la hora local terrestre en la longitud geográfica sobre la que está colocado el satélite es medianoche; obviamente, el satélite no tuviese baterías, el servicio se vería interrumpido alrededor de esa hora, durante el tiempo que durase el eclipse. Sin embargo, alrededor de la media noche todavía hay una alta demanda del servicio del satélite, por lo que desde un principio, cuando se le coloca en órbita, conviene situarlo en una longitud geográfica desplazada hacia el oeste con respecto a la zona geográfica de servicio; de esta forma el eclipse ocurre en realidad un poco más tarde.

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 prefieren porque son muy confiables y de larga duración. Sin embargo, algunos satélites utilizan baterías de níquel-hidrógeno, que poseen importantes ventajas tecnológicas y que quizás poco a poco las han ido reemplazando. Hay

otros tipos de baterías que se estuvieron investigando, por ejemplo, de plata-hidrógeno, litio y sodio, que en la actualidad seguramente ya se esta utilizando alguna variante de estas investigaciones.

|   | Montaje cilíndrico | Arreglos desplegados |
|---|--------------------|----------------------|
| Control de temperatura                          | Fácil              | Menos fácil          |
| "Ventanas" libres en la estructura del satélite | Difícil            | Fácil                |
| Area iluminada                                  | Aprox. 35%         | Toda                 |
| Potencia obtenible                              | Limitada           | Ilimitada            |
| Peso por unidad de potencia                     | ≈ 3 veces mas      | 1                    |
| Costo por unidad de potencia                    | ≈ 3 veces mas      | 1                    |



Radiación solar aprox: 1 350 W/cm<sup>2</sup>  
Eficiencia de una celda solar: de 10 a 15%

## CONFIGURACIÓN BÁSICA DEL SISTEMA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UN SATÉLITE.

### Celdas Solares.

- Silicio:  
Convencional  
Eficiencia: aprox. 12%
- Arseniuro de Galio (GaAs):

Estado de arte

Mayor eficiencia: aprox. 16%

### **Baterías.**

- **Níquel–Cadmio (NiCd):**  
Convencionales  
Pesadas
- **Níquel–Hidrógeno (NiH<sub>2</sub>):**  
Estado de arte  
Doble eficiencia por Kg.

### **SUBSISTEMA DE CONTROL TÉRMICO.**

Se indicó anteriormente que 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 de la temperatura, es el calor generado constantemente por el satélite en su interior, cuya principal contribución proviene de los amplificadores de potencia; la energía que absorbe el Sol y de la Tierra son otros factores que deben 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 mas el producido por la absorción de energía del Sol y de la Tierra, menor 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 de calor sobrante del satélite al vacío se efectúa por radiación; en su interior también se produce una ligera transferencia de calor en 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. Por otra parte, los módulos del interior, así como el subsistema de antenas que va al exterior, van cubiertos con algún tipo de material plástico aislante que los protege del calor o de los cambios bruscos de temperatura; así, por ejemplo, las antenas parabólicas van cubiertas por kapton, las antenas de corneta con mylar y kapton aluminizados, y algunos equipos internos con kapton, mylar y kevlar.

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 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°C, a diferencia de la pintura blanca cuya temperatura puede ser inferior a los -50°C. Entre otros acabados, también se utiliza en algunas secciones la pintura de aluminio; por tener una emitancia 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 –o sea, donde no inciden los rayos del Sol- de lo que serían si tuviesen un terminado con pintura negra. Es así, mediante la

combinación de materiales y colores, 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.

Sin embargo, 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 tomara 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; unos de los elementos más sensibles al frío son 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 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 POSICIÓN Y ORIENTACIÓN.**

El objetivo de un satélite de comunicaciones es recibir señales radioeléctricas desde alguna parte de la Tierra y retransmitirlas hacia otra a través de un subsistema de antenas direccionales, que por supuesto deben estar permanentemente bien orientadas hacia la zona geográfica de servicio. Para que

tal situación se logre, es necesario mantener la orientación de la estructura del satélite y estable con respecto a la superficie de la Tierra, lo cual se obtiene mediante las técnicas de estabilización por giro o de estabilización triaxial.

Con la técnica de estabilización por giro, una parte del satélite –o en algunos casos toda la estructura- gira para conservar el equilibrio del conjunto, al mismo tiempo que las antenas permanecen orientadas hacia la Tierra. En los primeros satélites que utilizaron antenas de haces direccionales, éstas se hacían girar en sentido contrario al giro de cuerpo cilíndrico del satélite, de tal forma que en realidad no se movían con relación a la superficie terrestre. Sin embargo, esta solución perdió practicidad al ir revolucionando las generaciones de satélites, y hoy sólo una parte de su cuerpo gira mientras que el resto de la estructura –que las antenas- se mantiene 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. Este mecanismo se denomina BAPTA; posee rodamientos para la interface mecánica, anillos conductores para la transferencia de energía eléctrica de una sección a otra y motores que controlan la velocidad relativa entre las dos secciones. El satélite, al girar sobre su eje –que es paralelo al de rotación de la Tierra- se vuelve menos vulnerable a las fuerzas perturbadoras descritas anteriormente.

Los satélites con estabilización triaxial no giran, y aparentemente permanecen estáticos con sus largos paneles solares extendidos en el vacío y sus antenas apuntando hacia la Tierra. En estos casos, la estabilización de la estructura del satélite se conserva mediante volantes giratorios que van colocados en su interior, sobre cada uno de los tres ejes utilizados como referencia para definir la orientación del satélite hacia la superficie terrestre.

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.

Por lo tanto, es preciso poder determinar, de alguna manera y en todo momento, dónde está el satélite y cual es la orientación exacta de su cuerpo. 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 (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 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, y tiene la ventaja de que sólo 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, se considera que la antena de la estación terrena está perfectamente orientada hacia el satélite, 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 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 en 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 esas variaciones; cuando los sensores están “viendo” sobre los bordes del horizonte terrestre, es

decir, sobre el contorno del planeta, ocurre un cambio muy brusco, pues el espacio que lo rodea se comporta como un medio sumamente frío en el infrarrojo, y el nivel de calor detectado tiende a cero. Es razonable suponer que 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.

La precisión que ofrecen los sensores solares y de Tierra en la determinación de la orientación de un satélite es relativamente aceptable en la mayor parte de los casos, pero en la nueva generación ya se está añadiendo otro tipo de control que permite mejorarla por un factor de 2 o hasta 3. El nuevo método utiliza sensores de radiofrecuencia, que detectan y miden las características de radiofaros o señales radioeléctricas transmitidas desde una estación terrena; los sensores determinan con gran precisión la diferencia angular que hay entre el eje principal de radiación de la antena del satélite y la línea o trayectoria de las ondas de radio del radiofaro o haz piloto.

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; el flujo de la información correspondiente se realiza por el subsistema de rastreo, telemetría y comando que se describe más adelante. Entre otros tipos de actuadores, se cuenta con los volantes o giroscopios, cuya velocidad de rotación se puede cambiar para producir un par correctivo; asimismo, hay bobinas que generan un momento magnético mediante una corriente eléctrica cuando ésta interactúa con el campo magnético de la Tierra, produciéndose así el par deseado de corrección; en ambos casos, sin embargo, la magnitud que se puede obtener en los pares generados de corrección es poca, y por consiguiente estos dispositivos son poco empleados como actuadores. Hay varios tipos de volantes estabilizadores, entre ellos, inerciales,

de momento, y de reacción con cojinetes magnéticos. Los más comunes, y que proporcionan niveles importantes en la magnitud de los pares necesarios de corrección, son los propulsores.

## **SUBSISTEMA DE PROPULSIÓN.**

El subsistema de propulsión o de control 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 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 de lanzamiento, es deseable utilizar propulsores que funcionen con combustible de impulso específico muy alto; para efectuar las correcciones de posición y orientación del satélite que 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. 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*, la cual goza de mucha popularidad. En este último tipo de propulsión, la hidrazina ( $N_2H_4$ ) es inyectada en una cámara donde se pone en contacto con un canalizador; como resultado, la primera se evapora y se descompone exotérmicamente en una mezcla de nitrógeno, hidrógeno y amoníaco, a temperaturas del orden de  $300^\circ C$  y con un impulso específico de unos 225 segundos. El impulso específico se puede mejorar incrementando la temperatura de los gases mediante algún sistema de calentamiento resistivo, después de la descomposición catalítica, hasta unos  $1900^\circ C$ , y antes de que escapen por la tobera; de esta forma, el impulso específico aumenta hasta unos 300 segundos (figura 6.9). 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.

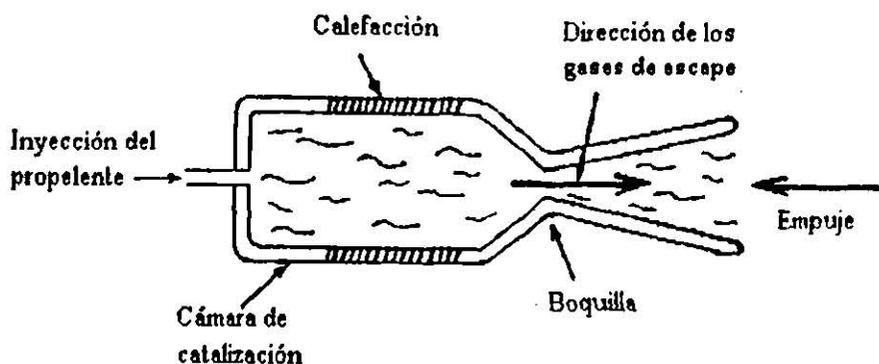


Figura 6.9. Cámara de catalización y boquilla de escape de un propulsor monopropelente.

Existe cada vez más la tendencia a utilizar sistemas bipropelentes, en 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 (a este tipo de propelentes se les llama hipergólicos); de estas sustancias, las más populares son la hidrazina monometílica (combustible) y el tetróxido de nitrógeno (oxidante), que al combinarse producen un impulso específico del orden de 300 segundos. La ventaja o 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 las maniobras de corrección de orientación y posición durante todos sus años de vida, utilizando para ello los mismos tanques de almacenamiento. 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. Algunos satélites utilizan la configuración bipropelente, pero su diseño es más complejo que el de los sistemas que emplean un motor de apogeo y un subsistema de propulsión separados.

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.

## **SUBSISTEMAS DE RASTREO, TELEMETRÍA Y COMANDO.**

Este sistema 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 por una señal digital que el satélite transmite hacia la Tierra con una velocidad baja, que se encuentra entre 200 y 1000 bps, 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 a su propia portadora, para retransmitirlos hacia la Tierra, en donde son detectados por el centro de control. Las señales recibidas en Tierra se comparan en fase con las transmitidas originalmente y las diferencias obtenidas permiten calcular la distancia a la que se encuentra el satélite, con precisión de unas cuantas decenas de metros.

La transmisión de las señales de telemetría y la retransmisión de los tonos de rastreo hacia la Tierra se realiza a través de un mismo amplificador a bordo del satélite, al igual que con las señales de comando que se hayan recibido, para que se verifiquen antes de que sean ejecutadas (figura 9.10). Durante los varios 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 como utilizar un amplificador que funcione a frecuencias mas bajas que las de la banda "C" o "Ku"; en esta etapa importante de su lanzamiento se emplean las bandas VHF y S, cuyas frecuencias son, respectivamente, de aproximadamente 140 Mhz y 2 Ghz, las transmisiones y recepciones se efectúan a través de la antena 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. 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 comando 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 ordenados.

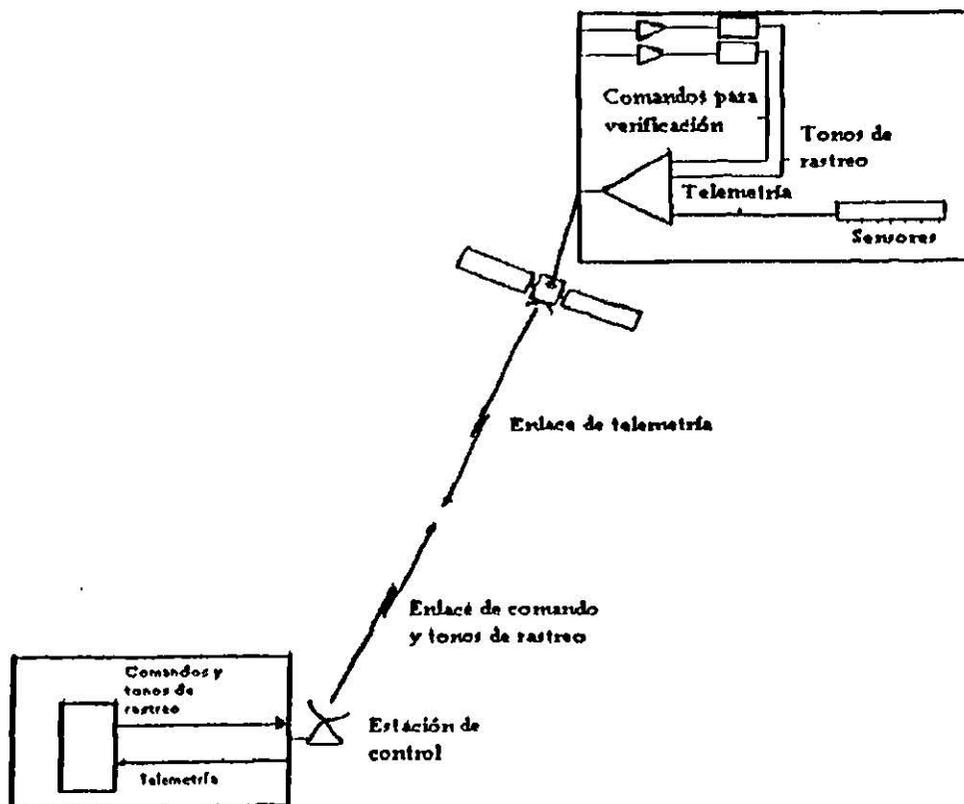


Figura 6.10. El subsistema de rastreo, telemetría y comando permite conocer y controlar la operación, posición y orientación del satélite.

## **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 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 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 fabricar la estructura, así como muchos 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 éstos, 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 el caso) se fabrica con “panal de abeja” (honeycomb) de aluminio, por ligereza y ligereza excelentes.

## BIBLIOGRAFÍA

### Diseño de Enlace de Comunicación

Ing. Fernando Estrada Salazar

FIME, UANL

### Satélites de Comunicaciones

Dr. Rodolfo Neri Vela

Editorial McGraw Hill

