
Capítulo 2 Estructura de un satélite

Los satélites cuentan con un conjunto de subsistemas integrados para llevar a cabo todas sus funciones. Los satélites necesitan energía eléctrica, disipar calor, corregir su posición y movimiento, mantenerse en equilibrio, ser capaz de regular su temperatura, ser resistentes al medio en el que se encuentran, y lo más importante, poder comunicarse con la Tierra.

Cada subsistema es trascendental y su mal funcionamiento podría causar la inutilidad parcial o total del conjunto, por lo que es importante mencionar cada uno de ellos para tener una idea más amplia de lo que son los satélites y como su estructura determinará las funciones que es capaz de realizar.

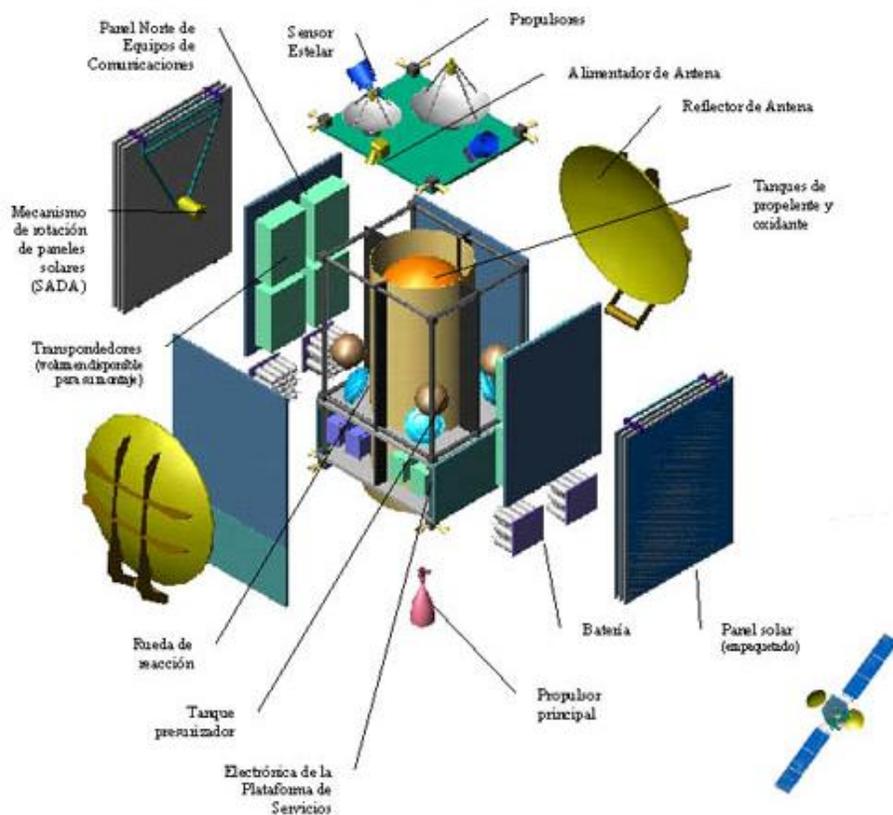


Figura 2-1: Partes que componen a un satélite con estabilización triaxial.

La estructura de un satélite se divide en dos conjuntos:

- Carga útil o de comunicaciones (Payload)
- Plataforma

La carga útil o de comunicaciones está compuesta del subsistema de antenas y el subsistema de comunicaciones. Su importancia reside en que son las partes que el dueño del satélite puede modificar de acuerdo al propósito para el que será destinado el aparato. Parámetros como potencia, ancho de banda y tipo de comunicación, son controlados por estos sistemas y dependen del usuario mas no del satélite. En cambio, la plataforma es el conjunto de subsistemas que forman las

características básicas dadas por el fabricante, se podría decir que es la parte que define al modelo, por lo que se utilizan como una plantilla en la cual serán incluidas distintas configuraciones de carga útil de acuerdo al uso al que será destinado. Está conformado por los subsistemas de control térmico, energía eléctrica, propulsión, posición y orientación, estructural y el subsistema de rastreo, telemetría y comando.

Siendo las comunicaciones una parte esencial de este trabajo, es necesario mencionar en qué consiste la carga útil y cuáles son sus principales funciones de manera que se explicará por separado cada subsistema ya que, tanto el de antenas como el de comunicaciones son trascendentales para los enlaces satelitales que más adelante se presentarán.

2.1 Subsistema de antenas

Las antenas son dispositivos que se encargan de recibir señales de radiofrecuencia provenientes de las estaciones terrenas transmisoras o de otros satélites, y después de que son amplificadas y/o procesadas en el satélite, las transmiten de regreso hacia otro destino, ya sea hacia la Tierra o hacia otro satélite, concentrada en un determinado haz de potencia.

Dentro de un satélite, las antenas son el puerto de entrada y salida de los elementos electrónicos ubicados en 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 sus subsistemas de comunicaciones y de rastreo, telemetría y comando.

El diseño de las antenas satelitales toma en cuenta ciertos parámetros que son necesarios para el buen funcionamiento del satélite, en especial, para poder transmitir y recibir señales de forma eficiente y, lo más importante, evitar interferir con otros sistemas, tanto satelitales como terrestres.

2.1.1 Ganancia de una antena

La ganancia de una antena está dada por la relación de la potencia radiada en cada unidad de ángulo sólido de la antena en una determinada dirección con la potencia radiada en cada unidad de ángulo sólido de una antena isotrópica. Sin embargo, al momento de diseñar una antena, se requiere conocer la ganancia en la dirección de máxima radiación, esto es, en la que se tiene la máxima ganancia, este parámetro se define como:

$$G_{m\acute{a}x} = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right) A_{eff_{max}}$$

En ésta expresión se puede observar que la ganancia máxima depende de la frecuencia, siendo la ganancia inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda. La $A_{eff_{max}}$ es un factor muy importante para el diseño de una antena, se conoce como área de apertura efectiva de la antena, y la forma de calcularla depende del tipo de antena que se utilice, por ejemplo, al utilizar una antena de corneta, se toma en cuenta el área de la cavidad por donde radia la antena, o bien, para una antena parabólica, se considera el área de la superficie del plano por donde es reflejada la señal. Sin embargo, para el cálculo del área efectiva se necesita considerar una variable propia de la antena: la eficiencia.

La eficiencia es el producto de varios factores tales como una superficie irregular de la antena, eficiencia de iluminación al tener un reflector, pérdidas resistivas e inductivas, etc. Todos estos

factores degradan la eficiencia total de la antena lo que conlleva a una menor ganancia y menor área efectiva.

Tomando en cuenta la eficiencia de la antena, que generalmente la da el fabricante, se calcula el área geométrica (A) de la superficie que trasmite la señal y se multiplica por la eficiencia de la antena (η), esto es:

$$A_{eff} = A \cdot \eta$$

La Figura 2-2, muestra la relación entre ganancia de la antena y su diámetro tomando en cuenta que se tiene una antena con apertura circular o un reflector parabólico circular.

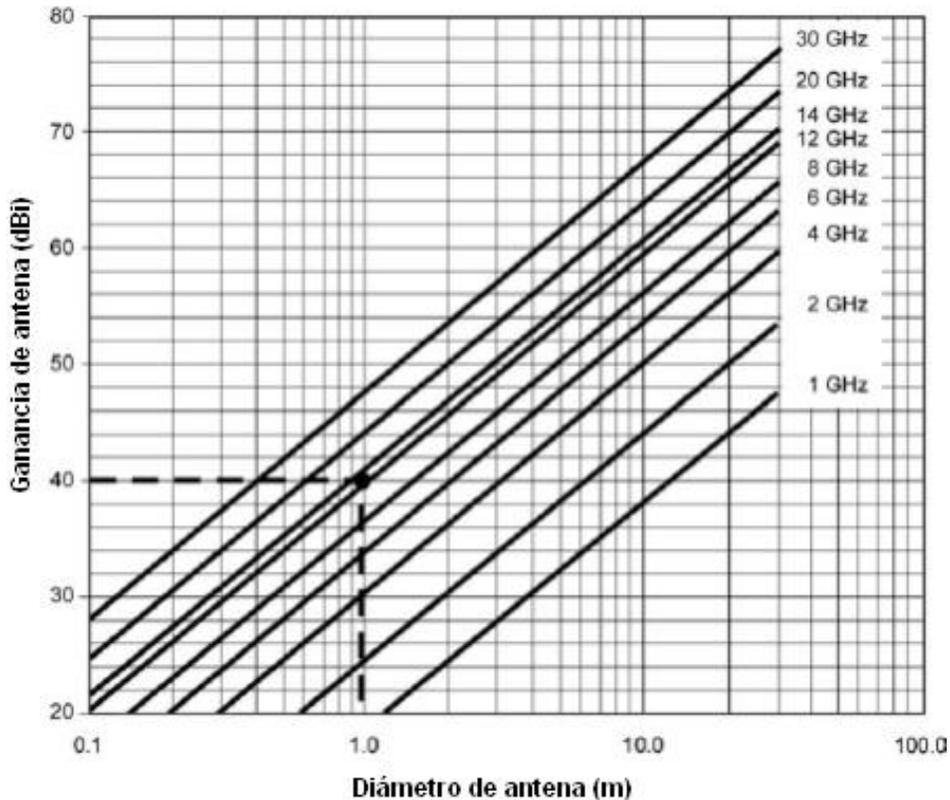


Figura 2-2: Ganancia vs diámetro de una antena parabólica.

Al hacer el diseño de un satélite se debe buscar un arreglo satelital que cumpla con los requerimientos básicos, por ello la frecuencia es fija de acuerdo al servicio que se dará, por ello la ganancia máxima depende del área efectiva de la antena, por ejemplo, si se quiere tener una gran ganancia, entonces una solución sería utilizar una antena de grandes dimensiones, claro que ya en la práctica esto podría ser un problema ya que los satélites entre más grandes, más pesado, lo que genera más gastos; para solucionar esto se diseñan arreglos complejos que permiten sumar la ganancia de varias antenas para incrementar la ganancia total.

2.1.2 Patrón de radiación

Un parámetro muy importante de toda antena es el patrón de radiación, el cual indica las variaciones de la ganancia con respecto a la dirección en la que se está radiando, por lo que se suele representar gráficamente tanto en coordenadas polares (grados) como en coordenadas cartesianas (Figura2-3).

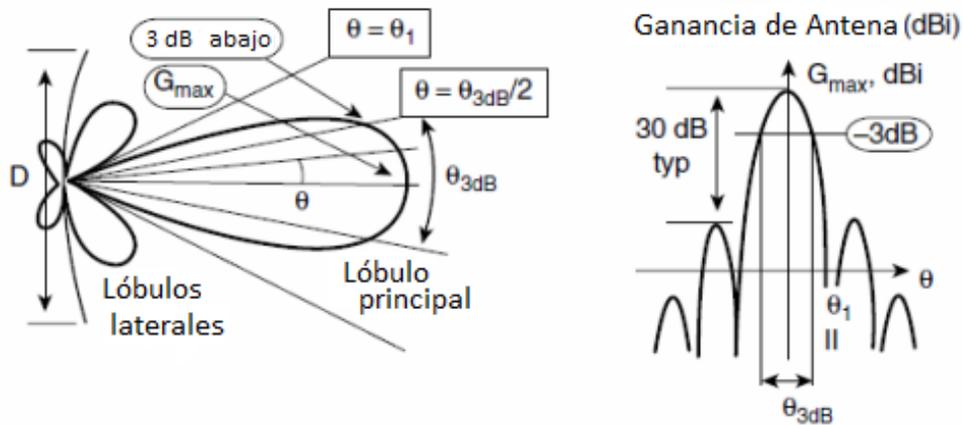


Figura 2-3: Ejemplo de la representación gráfica de un patrón de radiación.

El patrón de la izquierda es la representación en coordenadas polares de la ganancia que varía de acuerdo a la dirección, en este caso angular; en comparación, tenemos el patrón de la derecha que muestra la variación de la ganancia con respecto a la dirección (en radianes), graficada en un plano cartesiano. Haciendo un análisis de las dos gráficas se pueden obtener ciertos parámetros importantes que ayudan al diseño de una antena.

Se observa que la superficie en coordenadas polares está formada de varios lóbulos. El más grande se conoce como lóbulo principal; a continuación, de acuerdo al tamaño, siguen los lóbulos laterales o secundarios, de menor ganancia; por último se tienen los lóbulos posteriores. De acuerdo a la complejidad de la antena será la cantidad de lóbulos que presenta, siendo el lóbulo principal el de mayor interés.

El lóbulo principal es aquel que tiene en el centro a la dirección de máxima ganancia. Será más estrecho o más ancho de acuerdo a lo que se conoce como ángulo de apertura que define el rango de valores de ángulos dentro de los cuales se considera al lóbulo principal.

El ángulo de apertura está limitado por las direcciones en la que la ganancia máxima disminuye en 3dB. Se podría representar como:

$$\theta_{\text{apertura}} = \theta_{3dB} / 2$$

Siendo el θ_{3dB} el ángulo que definirá al ancho de haz, en el cual se encuentra la dirección de máxima radiación, delimitado por las direcciones en las que la ganancia será de -3dB con respecto a la máxima ganancia.

Otro parámetro importante es la diferencia entre la ganancia máxima del lóbulo principal y la ganancia máxima del lóbulo secundario. A esto se le conoce como NPLS (Nivel del Lóbulo Principal a Secundario). En la gráfica en coordenadas polares se indica, por ejemplo, un valor de 30dB. Este mismo cálculo se debe realizar con todos los lóbulos, inclusive con los lóbulos posteriores, en los que se define como relación F/B (adelante/atrás). Esto se debe a que entre mayor sea la diferencia entre la ganancia de los lóbulos, con respecto al lóbulo principal, existirá menor probabilidad de generar interferencias, por lo que será importante considerarlo posteriormente en este trabajo.

Un dato a considerar, de acuerdo a la Figura 2-4, es que entre más ganancia la antena, su ancho de haz será más pequeño, esto quiere decir que la energía se concentra en menos espacio, y por el

contrario, entre menor sea la ganancia de una antena tendrá un ancho de haz más grande, por lo que el lóbulo principal será más ancho.

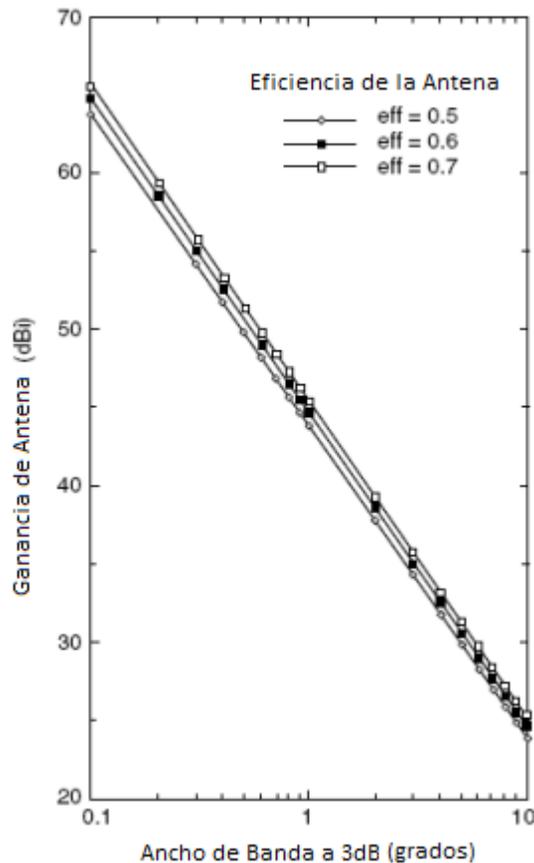


Figura 2-4: Ganancia de la antena en la dirección de máxima radiación con respecto al ancho de haz.

2.1.3 Polarización

Las antenas pueden trabajar con muchos tipos de polarización distintas y esto depende del diseño. Esta propiedad depende de las variaciones en la dirección de la componente de campo eléctrico. Su utilización permite combatir las interferencias del medio y, lo más importante, permite el reúso de frecuencias.

La polarización está definida por dos componentes de campo eléctrico. Estas componentes varían tanto en amplitud como en fase.

Existen 3 tipos de polarización:

- Lineal
- Circular
- Elíptica

La polarización lineal es vertical si la componente del campo eléctrico en el eje horizontal es igual a cero y horizontal si la componente en el eje vertical es igual a cero.

La polarización circular puede ser con rotación a izquierdas o con rotación a derechas, esto de acuerdo a la variación en los ejes horizontal y vertical.

La polarización elíptica es muy parecida a la circular con la diferencia de que la variación en el eje vertical y el eje horizontal del campo eléctrico es distinta, lo que provoca que se tengan un eje mayor y un eje menor.

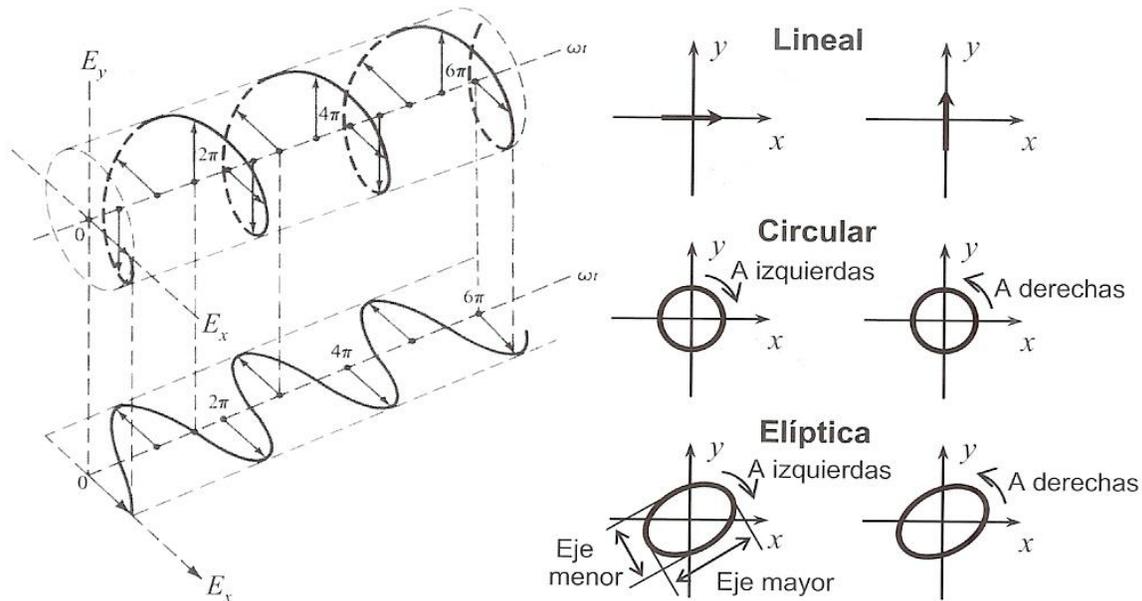


Figura 2-5: Tipos de polarización.

Un aspecto importante que se debe de tomar en cuenta al utilizar determinada polarización en un enlace es que, tanto la antena transmisora como la antena receptora deben utilizar el mismo tipo de polarización, esto es por el principio de reciprocidad.

El principio de reciprocidad, en términos generales, menciona que las propiedades de una antena para transmitir son las mismas propiedades para recibir, por ello la polarización de una antena es la misma para recibir y para transmitir, este principio es el mismo para la ganancia y el patrón de radiación.

Para el caso de la polarización, se sabe que una polarización horizontal es ortogonal a una polarización vertical, esto quiere decir que no están correlacionadas ya que el producto punto de las dos es igual a cero. Esta propiedad se utiliza para el reúso de frecuencias que se explicará más adelante y es lo que evita que una antena con polarización horizontal acepte a señales con polarización vertical. Para señales con polarización circular, la ortogonalidad se da de acuerdo a la rotación de las señales, siendo las que tienen rotación derecha ortogonal a las de rotación izquierda, esto es análogo a la ortogonalidad en la polarización elíptica.

2.1.4 Frecuencia de operación

Otra propiedad de las antenas es que entre más alta sea la frecuencia de operación, la capacidad para concentrar la energía será mayor, esto debido a la disminución de la longitud de onda, lo que permite utilizar antenas de menores dimensiones con mayor ganancia. Esta es una propiedad en general de las antenas de apertura, cuya capacidad de concentrar la potencia en un haz invisible

de radiación o iluminación muy angosto es función directa de sus dimensiones eléctricas y no sólo de las físicas.

2.1.5 Dimensión eléctrica

Para ciertos cálculos se considera a la dimensión eléctrica, la cual se conoce como la dimensión física de la antena dividida entre la longitud de onda de la frecuencia de operación, esto significa, obtener el número de veces que cabe una onda electromagnética alineada a lo largo de la mayor dimensión de la antena ya sea en su apertura o en su boca. En el caso de las antenas parabólicas, sería cuantas longitudes de onda caben en el diámetro del plato parabólico.

2.1.6 Tipos de antenas

Las antenas más utilizadas en los satélites son monopolos, dipolos, helicoidales, bicónicas, cornetas, platos parabólicos y arreglos de diversos tipos, siendo las parabólicas de las más utilizadas en comunicaciones.

Las antenas de corneta son unas de las más simples, se utilizan para cubrir amplias zonas de cobertura. Están conformadas por una guía de onda y una boca en forma del tipo de corneta (piramidal, plano E, plano H, etc.) Su desventaja es que cuando se quieren tener zonas de cobertura pequeñas es necesario utilizar cornetas más grandes, por lo que es poco práctico utilizarlas si se quiere obtener áreas de cobertura muy pequeñas. Estas antenas suelen utilizarse como alimentadores en conjunto con reflectores parabólicos que logran la obtención de estas zonas de cobertura difíciles con solo una corneta.

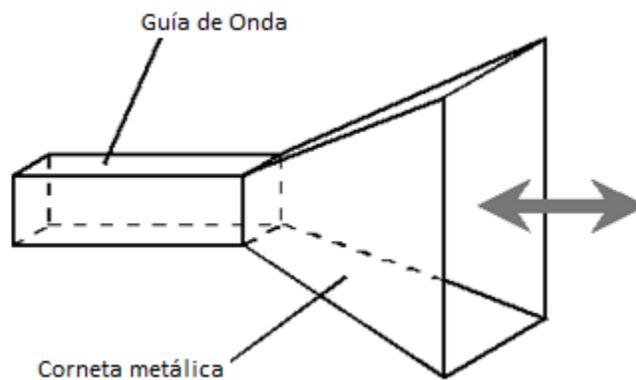


Figura 2-6: Antena de corneta.

Las antenas parabólicas se componen de un reflector parabólico que se encarga de orientar la señal en dos direcciones. En las antenas parabólicas transmisoras el reflector parabólico refleja la señal radioeléctrica generada por un dispositivo radiante que se encuentra ubicado en el foco del reflector parabólico, y los frentes de ondas que genera salen de este reflector en forma más coherente que otro tipo de antenas, mientras que en las antenas receptoras el reflector parabólico concentra la onda incidente en su foco donde también se encuentra un detector.



Figura 2-7: Antena parabólica.

Las antenas parabólicas chicas pueden recibir y transmitir dentro de una extensión territorial muy grande, mientras que una antena de mayor tamaño, operando a la misma frecuencia, solamente puede hacerlo dentro de una zona geográfica más pequeña, porque su haz principal de radiación es más angosto. Este efecto se debe a que las antenas parabólicas a mayor tamaño, mayor será la concentración de la energía en un haz más angosto, por lo tanto, la ganancia será mayor entre más angosto sea el haz de radiación; esto facilita el diseño y reduce el costo de estaciones terrenas receptoras porque reciben señales de mayor intensidad, permitiendo sistemas receptores con menor sensibilidad.

Los platos parabólicos son iluminados desde su foco geométrico por antenas de corneta de banda ancha, y la eficiencia del conjunto suele ser de 55% o mayor, llegando hasta el 75%. La dirección de máxima radiación, para el caso de un plato parabólico, generalmente coincide con su eje, pasando por su vértice y su foco. En el foco se coloca el alimentador, pudiendo ser una o varias cornetas en forma de arreglo.

Existen distintos tipos de configuraciones y tecnologías para las antenas con reflector, es importante mencionar los más utilizados:

Reflector parabólico Cassegrain (dos reflectores): Consiste en el uso de un alimentador que genera una señal la cual rebota en un reflector hiperbólico que direcciona la señal hacia otro reflector, en este caso parabólico que concentra la señal y la manda hacia la zona de cobertura.

Reflector parabólico Gregoriano (dos reflectores): Es igual que el Cassegrain con la diferencia de que éste utiliza un primer reflector parabólico en lugar de hiperbólico. Su funcionamiento es similar.

Estos dos reflectores tienen la ventaja de simplificar el diseño al poder obtener zonas de cobertura más pequeñas.

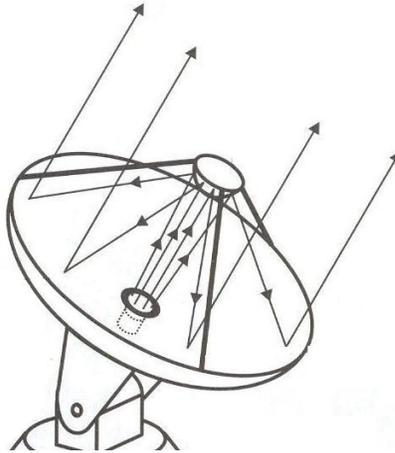


Figura 2-8: Antena con reflector Cassegrain.

Reflector asimétrico (Offset): Esta técnica se utiliza debido a que los alimentadores por lo general están en frente de los reflectores, lo que provoca que afectan la señal que viene de estos, por lo que se recorta el reflector de forma que al rebotar las señales, sean enviadas a un lado del alimentador. Este tipo de configuración suele ser utilizada en antenas que funcionan en el despegue y durante el tiempo de acomodo en la órbita correspondiente.



Figura 2-9: Antena con reflector Offset.

Además de estas tecnologías, también se utilizan las llamadas antenas con reflectores de rejilla, reflectores con superficie irregular y las antenas de reflector con arreglo de alimentadores.

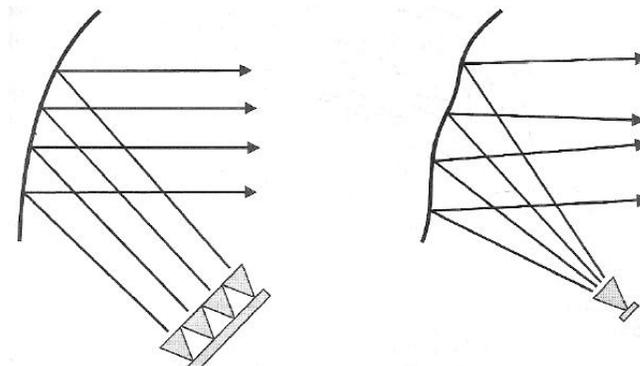


Figura 2-10: A la derecha una antena con reflector de superficie irregular. A la izquierda una antena parabólica con un arreglo de alimentadores.

Además de las antenas parabólicas, existen antenas que utilizan lentes que concentran las señales radiadas por uno o varios alimentadores. Tienen la ventaja de no tener un bloqueo del haz radiado al estar configuradas de forma que el alimentador se encuentre en la parte de atrás. Son construidas por un material dieléctrico homogéneo que le permite manejar un ancho de banda considerable y un alto rendimiento.

Por último es conveniente mencionar a los arreglos de antenas. Estos se realizan por medio de varios alimentadores que se diseñan para trabajar con cierta fase un respecto del otro para formar zonas de cobertura elípticas o irregulares, tema del cual es necesario profundizar para comprender la utilidad de generar haces irregulares, a pesar de que su configuración es muy compleja y requiere de muchos elementos.

2.1.7 Huellas simétricas y asimétricas

La zona de cobertura de un satélite es el área en la superficie terrestre en la que puede dar servicio de acuerdo a la capacidad con la que cuenta la configuración de antenas que transmiten y reciben desde el satélite todo tipo de señales de radiofrecuencia.

A las zonas de cobertura se les conoce como huellas. Las huellas grandes se conocen como globales y siendo redondas o elípticas se pueden obtener por medio de antenas de corneta o antenas parabólicas sencillas.

En las primeras décadas de los satélites, el patrón de radiación del plato parabólico era simétrico, sin embargo, hoy en día, la mayoría de los satélites geoestacionarios tienen haces conformados o perfilados que poseen huellas de iluminación irregulares de cobertura nacional, regional o hemisférica. Por su parte, los haces puntuales o pincel, dada su naturaleza de cobertura reducida, sí tienen una huella más o menos simétrica.

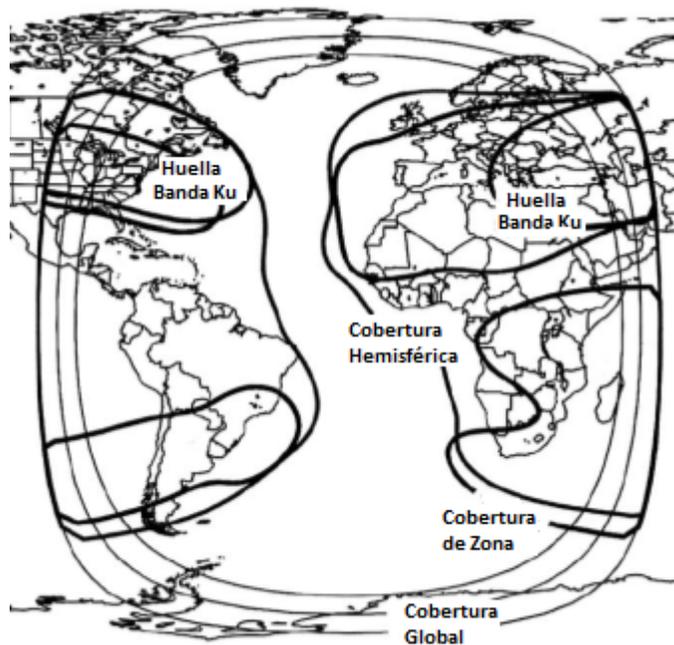


Figura 2-11: Ejemplo de los distintos tipos de huellas.

Generalmente, los haces globales se obtienen con antenas de corneta, cuya apertura tiene una dimensión eléctrica relativamente pequeña; las cornetas pueden ser piramidales o cónicas, ya sea con polarización lineal o circular. Los haces hemisféricos se logran con platos parabólicos pequeños; y los tipo pincel o puntual, requieren platos parabólicos grandes. Con un solo alimentador o corneta que ilumine al reflector, es posible obtener huellas circulares o elípticas, dependiendo de la forma de la región a iluminar, por lo que muchas veces suelen ser de contornos irregulares, por lo que es necesario idear huellas irregulares.

Para el caso de huellas simétricas, la ganancia en cualquier dirección se calcula utilizando como referencia la dirección de máxima radiación, y una variable que define los grados de desviación con respecto a ésta dirección. Sin embargo, el problema surge al querer calcular la ganancia en huellas irregulares. Para estos casos, se utiliza un parámetro conocido como PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Efectiva).

Las huellas PIRE, que son dadas por el fabricante o por el operador, es un concepto que combina la ganancia de la antena transmisora (G) en una determinada dirección con la potencia total (P_T) que recibe del amplificador conectado a ella, esto es:

$$PIRE = G \times P_T$$

Siendo el producto de la potencia entregada a la antena por la ganancia ésta en cierta dirección. Los contornos PIRE se definen como los lugares geométricos en los que el PIRE es constante e igual a un determinado valor y tienen trayectorias irregulares cuando los haces de radiación son asimétricos. En otras palabras, los contornos PIRE son similares a los de la ganancia de la antena, a la misma frecuencia. Sin embargo, al ser el PIRE proporcionado por el fabricante a una cierta frecuencia, y la ganancia un valor que cambia con la frecuencia dentro del rango de los enlaces descendentes; es posible tener ligeros cambios en la forma del patrón de radiación de la antena conforme la frecuencia aumente o disminuya, tanto por su dimensión eléctrica como por el efecto de su superficie perfilada o de su red alimentadora con desplazamiento de fases.

Para obtener una huella irregular, o bien, múltiples huellas se utilizan arreglos como los presentados en la Figura 2-12.

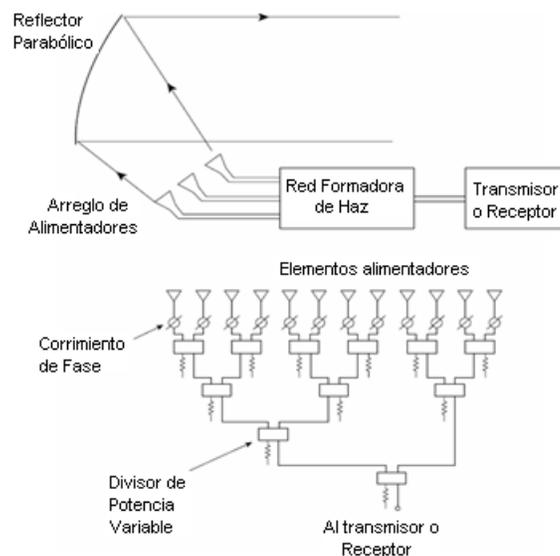


Figura 2-12: Configuraciones de arreglo de alimentadores para generar huellas irregulares.

Se puede observar que para diseñar arreglos se necesitan estructuras más complejas que permitan la transmisión simultánea de varias señales con baja potencia al tener que utilizar divisores de potencia y con distinta fase para lograr deformar el haz que se radia hacia un reflector o lente que proyectará ese haz hacia la zona en la que se busca tener servicio.

Un satélite puede tener más de una huella de iluminación, estas huellas pueden operar en la misma banda o en distintas bandas, en una o varias regiones, todo depende de las necesidades del propietario y por supuesto de la configuración de las antenas que tenga.

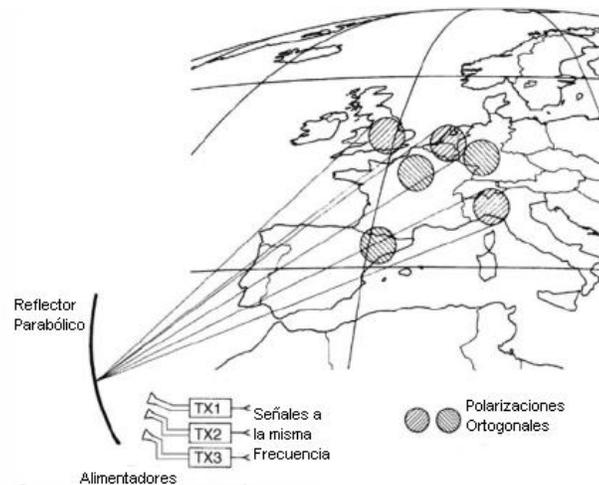


Figura 2-13: Generación de múltiples huellas con polarización ortogonal. Reutilización de frecuencias.

Para el caso de múltiples huellas, se pueden utilizar polarizaciones ortogonales en los alimentadores de tal forma que se puedan reutilizar frecuencias y permite la generación de mayor número de haces puntuales. Esto es útil cuando se tiene el caso de huellas contiguas que forman un especie de arreglo celular en el cual dos huellas juntas no deben trabajar con la misma frecuencia o bien con la misma polarización, en este caso es útil considerar las recomendaciones de la UIT para poder diseñar adecuadamente los arreglos de antenas que permitan un buen servicio sin interferir con otras señales tanto espaciales como terrestres.

Una gran utilidad de las huellas irregulares es que permiten evitar el desperdicio de potencia al no transmitirla a puntos en donde no hay tráfico o estaciones terrenas transmisoras y receptoras, y en cambio es aprovechada mejor controlándola para que sólo ilumine los sitios en los que sí hay densidades importantes de población, equipos y gran demanda de comunicaciones.

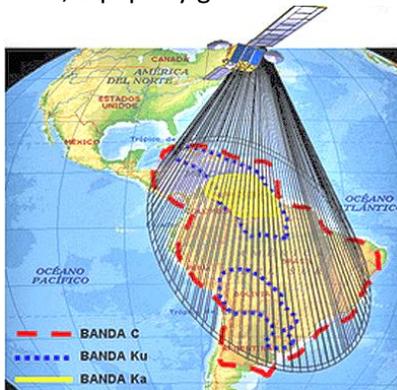


Figura 2-14: Huella irregular de un satélite.

Se debe recordar que la densidad de potencia recibida en cada punto de la Tierra es la suma vectorial (vector de Poynting) de las densidades de potencia contenidas en todos los haces que contengan a dicho punto; si las ondas electromagnéticas están en fase, se reforzaran entre sí; y si están fuera de fase, se debilitarán o cancelarán entre sí. De ahí que hay regiones que reciben altos niveles de potencia y otros que reciben menos o nada. El reto para el diseñador del arreglo es está precisamente en lograr altos niveles de potencia en la región geográfica deseada, y para ello puede trabajar con diversas variables (número de cornetas, tamaños de ellas, posición de cada una en la región focal, intensidad de la potencia radiada por cada una de ellas, y la fase de las mismas, etc.) en un programa especializado de computadora. Después de muchos intentos y comparaciones con el resultado esperado, obtendrá un arreglo “óptimo”. El asunto de ajustar la fase de cada corneta adecuadamente está relacionado con las pequeñas diferencias de trayectoria entre un haz y otro, ya que las cornetas están en posiciones diferentes con relación al foco geométrico.

Si los diámetros de los haces pueden ser distintos y el número de cornetas también, el diseño óptimo sería aquel que se ajustase lo mejor posible al territorio, con el mínimo número posible de cornetas para reducir el peso del satélite, y por consiguiente, los costos del lanzamiento.

2.1.8 Otras antenas

En lo que se refiere a las antenas de comando y telemetría, éstas deben tener características de radiación que les permita ser útiles tanto bajo condiciones normales como anormales de operación. En condiciones normales, los datos de telemetría y comando son preferentemente transmitidos por platos parabólicos de comunicaciones. También pueden usarse cornetas con cobertura global. Sin embargo, durante la colocación en órbita o en periodos anormales durante su vida útil, es muy probable que dichos platos estén plegados o que simplemente, no apunten hacia la Tierra. En esos momentos, es vital obtener información de telemetría y enviar comandos, por ello los patrones de radiación de las antenas requeridas para estos casos deben ser casi omnidireccionales (La única antena omnidireccional es la isotrópica que no es físicamente realizable). Para esto, se utiliza la antena bicónica que resulta particularmente adecuada, ya que tiene un patrón toroidal. Su funcionamiento consiste en la suma vectorial de los campos radiados por muchas antenas idénticas, en donde cada antena es alimentada con cierta fase y magnitud de potencia. Al variar las magnitudes y las fases relativas de todos los elementos del arreglo, se obtienen haces de diferentes formas y con dirección o apuntamiento variable. Como el esquema de de alimentación no es fijo, sino controlable electrónicamente por medio de un procesador, es posible reconfigurar los haces según se requiera, aun cuando el aparato esté en órbita. A estos arreglos se les conoce como APA (Active Phased Array).

Por otro lado, los arreglos con tecnología MMIC, que consiste en antenas de microcinta, amplificadores de potencia y de bajo ruido, desplazadores de fase, conmutadores y líneas de RF para alimentación, están hechos en forma de capas o ladrillos con tecnología de arseniuro de galio (GaAs) y presentan un gran reto a sus fabricantes. Dependiendo de la banda en la que opera el satélite será el número de haces que produzca cada antena transmisora o receptora. Siendo arreglos muy complejos que pueden producir un gran número de haces, logrando así coberturas irregulares en la superficie terrestre.

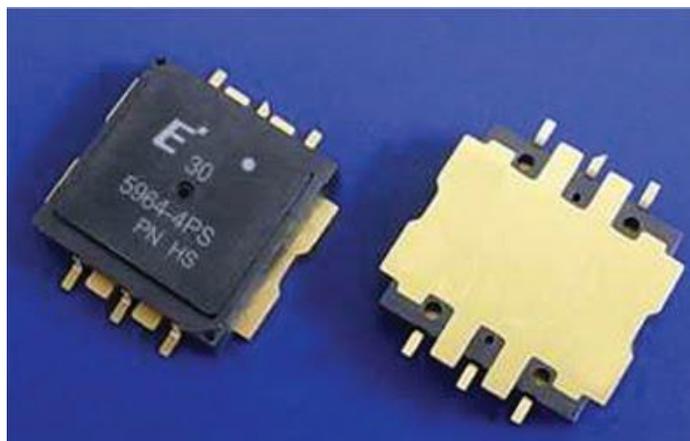


Figura 2-15: Amplificadores hechos con tecnología MMIC.

Para el caso de los enlaces de subida, por ejemplo de una estación transmisora terrestre, se utiliza el concepto de huellas de G/T, en la cual los fabricantes indican la ganancia de las antenas receptoras del satélite y T la temperatura total de ruido introducido durante todo el trayecto de subida. Como el patrón de radiación de las antenas con huella irregular es similar tanto para transmisión como para recepción, conviene usar los contornos de G/T, porque ya contienen la información de la ganancia de la antena en la dirección hacia donde está cierta ciudad, así como la temperatura de ruido de esa dirección.

2.2 Subsistema de comunicaciones

Entre la antena receptora y la antena transmisora, se encuentra lo que conocemos como subsistema de comunicaciones. Las señales que llegan al satélite, son recibidas por las antenas receptoras y, en el interior del satélite, son separadas por grupos, amplificadas, tal vez procesadas digitalmente, y son trasladadas a frecuencias más bajas; posteriormente, son amplificadas aún más y reagrupadas, para que todas salgan de regreso hacia la Tierra a través de la antena transmisora. Al grupo de señales se le conoce como canal de banda ancha. Cada uno de estos canales tiene un ancho de banda de varios MHz y puede contener uno, algunos o cientos de canales de datos, de telefonía o de televisión, según la tasa de transmisión y técnicas empleadas de modulación, multiplexaje y acceso múltiple. A cada uno de estos canales de banda ancha, se les conoce como transpondedor. Un satélite, generalmente tiene 12 transpondedores para una determinada banda de trabajo y polarización. Un transpondedor es toda la cadena de unidades o equipos interconectados en serie del canal de banda ancha, desde la antena receptora hasta la antena transmisora.

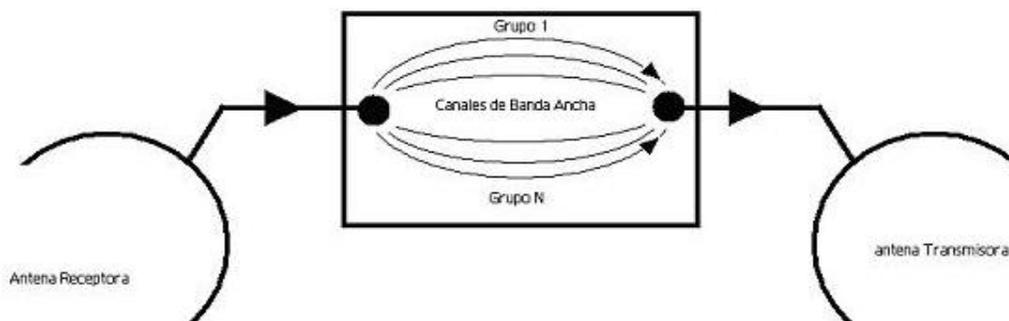


Figura 2-16: Representación de un canal de banda ancha.

2.2.1 Bandas de frecuencia asignadas

La capacidad de un satélite está limitada por dos factores: ancho de banda y potencia de los amplificadores. Por ello, la UIT atribuyó una parte del espectro de frecuencias comprendida de 0.1 a 400 GHz aproximadamente. Esta parte del espectro comprende 4 bandas principales de frecuencias: VHF (Very High Frequency), UHF (Ultra High Frequency), SHF (Super High Frequency) y EHF (Extremely High Frequency).

La banda VHF está comprendida entre los 30 y 300 MHz; la banda UHF está comprendida entre los 300 MHz y 3 GHz; y la banda SHF se encuentra entre los 3 y 30 GHz. Estas bandas son muy amplias y han sido divididas en sub-bandas. UHF se divide en las bandas L y S, mientras que SHF se divide en las bandas C, X, Ku y Ka, que son empleadas por satélites civiles y militares para diferentes tipos de servicios. Los tres principales servicios son FSS, MSS y BSS.

- FSS (Fixed Satellite Service) o servicio fijo por satélite es un término genérico que se aplica a todo servicio de comunicaciones que no sea ni móvil ni de radiodifusión. La mayoría de los satélites de comunicaciones entran en esta categoría.
- MSS (Mobile Satellite Service) o servicio móvil por satélite se refiere a toda comunicación entre dos puntos arbitrarios en tierra firme, aire o mar; uno de estos puntos puede estar cambiando de posición, o bien ambos.
- BSS (Broadcast Satellite Service) o servicio de radiodifusión por satélite es una categoría especial en la que las señales transmitidas son recibidas directamente en receptores fijos o móviles.

Las bandas asignadas a cada servicio dependen de la región, esto de acuerdo a la configuración que la UIT dio dividiendo en tres regiones al mundo: la región 1 abarca África, los países Árabes, Europa y los países que constituían a la URSS; la región 2 abarca los países de América; y la región 3 incluye a Asia y Oceanía, existiendo algunas diferencias menores en la atribución de frecuencias para cada región y excepciones registradas por países de forma individual.

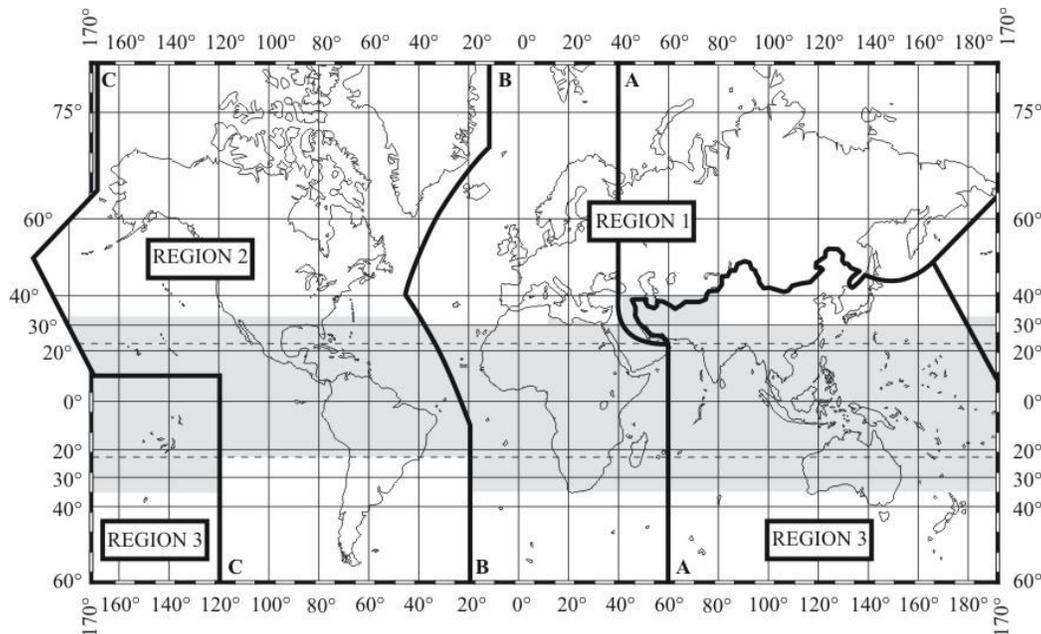


Figura 2-17: División del mundo en 3 regiones por la UIT.

Las bandas de VHF, UHF, y en particular la banda L (con frecuencia central a 1.5 GHz), son usadas para comunicaciones móviles con ancho de banda limitado; la S (con frecuencia central de 2 GHz) también es empleada en comunicaciones móviles y ciertos servicios de recepción de TV. Sin embargo el ancho de banda disponible en estas bandas es muy pequeño comparado con las bandas superiores.

La Tabla 1 muestra las bandas en que operan los tres servicios satelitales mencionados en la región 2, en la cual se encuentra el continente americano.

Banda	Enlace ascendente (GHz)	Enlace descendente (GHz)	Servicio
C	5.925 - 6.425	3.7 - 4.2	FSS
X	7.9 - 8.4	7.25 - 7.75	Comunicaciones militares
Ku	14 - 14.5	11.7 - 12.2	FSS
	17.3 - 17.8	12.2 - 12.7	BSS
Ka	27.5 - 31	17.7 - 21.2	FSS
Q/V	47.2 - 50.2 (Banda V)	39.5 - 42.5 (Banda Q)	FSS

Tabla 1: Frecuencias de operación y servicios para las principales bandas utilizadas en comunicaciones satelitales.

Las bandas C y Ku son las más usadas actualmente por los satélites comerciales, pero como ya es casi imposible dar nuevas posiciones para más satélites que trabajen en estas bandas sin interferir con satélites vecinos ya existentes, también ha comenzado a ser aprovechada la banda Ka. Ésta banda tiene la ventaja de abarcar un ancho de banda muy atractivo de 3.5 MHz, sin embargo tiene la desventaja de que cuando llueve los niveles de atenuación a esas frecuencias son mucho mayores que en las bandas C y Ku. Finalmente, la banda X está reservada para transmisiones militares y gubernamentales.

Cabe mencionar que actualmente se busca introducir sistemas que funcionen en las bandas Q y V las cuales se encuentran dentro del rango de la banda EHF que se encuentra entre los 30 y 300 GHz. El atractivo de estas bandas reside en que se tiene un ancho de banda total de 3 GHz para satélites geoestacionarios y 1 GHz para las órbitas bajas e intermedias. Sin embargo, para que esto sea factible, es necesario solucionar los problemas de los efectos de propagación, absorción atmosférica y atenuación por lluvia que son muy severos en estas frecuencias.

2.2.2 Reutilización de frecuencias

Debido a que el espectro disponible en cualquier banda es finito, la capacidad de un satélite de comunicaciones está determinada por este factor. Para incrementar la capacidad de un sistema satelital, existen métodos de reuso del espectro de frecuencia que han sido desarrollados e implementados.

La reutilización de frecuencias se puede realizar por dos métodos distintos: con aislamiento espacial y con discriminación de polarización.

2.2.2.1 Reutilización de frecuencias con aislamiento espacial

El aislamiento espacial en satélites se realiza utilizando la misma banda de frecuencia en diferentes transpondedores y haces de antenas iluminando distintas áreas de cobertura. Los haces de cada antena deben estar separados lo suficiente para proveer un aislamiento suficiente para prevenir interferencia, un requerimiento típico es tener un aislamiento de 27 dB.

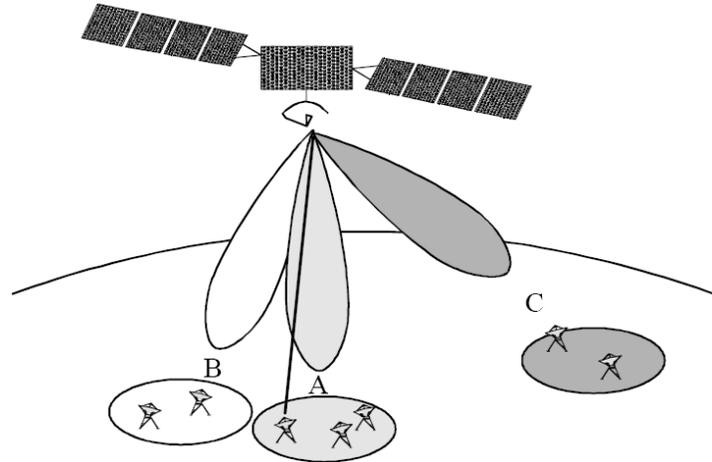


Figura 2-18: Reúso de frecuencias utilizando aislamiento espacial.

En la Figura 2-18, se muestra un ejemplo de aislamiento espacial, se puede ver que si una estación terrena en el área de servicio A recibe una portadora destinada para el servicio B o C, ésta debe estar por lo menos 27 dB por debajo de la portadora destinada para esas zonas.

El aislamiento está limitado por el nivel de ganancia relativo entre los dos haces o por el nivel de los lóbulos laterales. En el caso de tener un aislamiento insuficiente, una posible solución es introducir un aislamiento suplementario implementando portadoras con polarización cruzada entre dos haces que se encuentran muy cerca.

2.2.2.2 Reutilización de frecuencias con discriminación de polarización

Se realiza mediante la transmisión simultánea en un mismo haz, pero en distintos transpondedores, en la misma banda de frecuencia, señales de polarizaciones ortogonales; dos polarizaciones son ortogonales entre sí cuando sus vectores de campo eléctrico forman 90° en todo momento. Los sistemas que emplean polarización circular tienen la ventaja de que sus antenas no necesitan orientación de polarización.

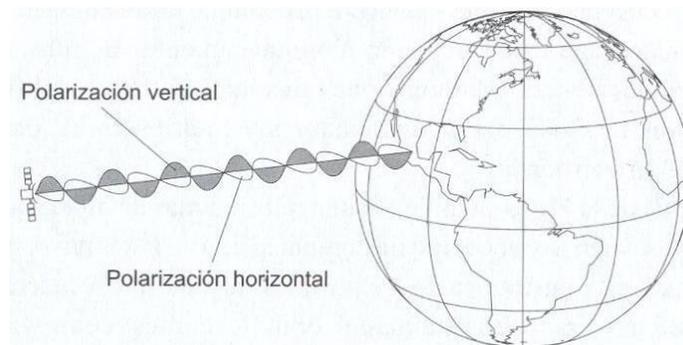


Figura 2-19: Reúso de frecuencias utilizando discriminación de polarización.

En un satélite, puede haber dos antenas distintas, cada una con una polarización distinta o una misma antena utilizando las dos polarizaciones. En el segundo caso, la antena es conectada a un transpondedor a través de un acoplador de microondas con dos puertos con polarización ortogonal, conocidos como OMT (Ortho-Mode Transducer). En las bases terrenas, siempre debe de haber una antena equipada con un transmisor/receptor OMT. Los valores típicos de discriminación entre las dos polarizaciones está entre 30 y 35 dB.

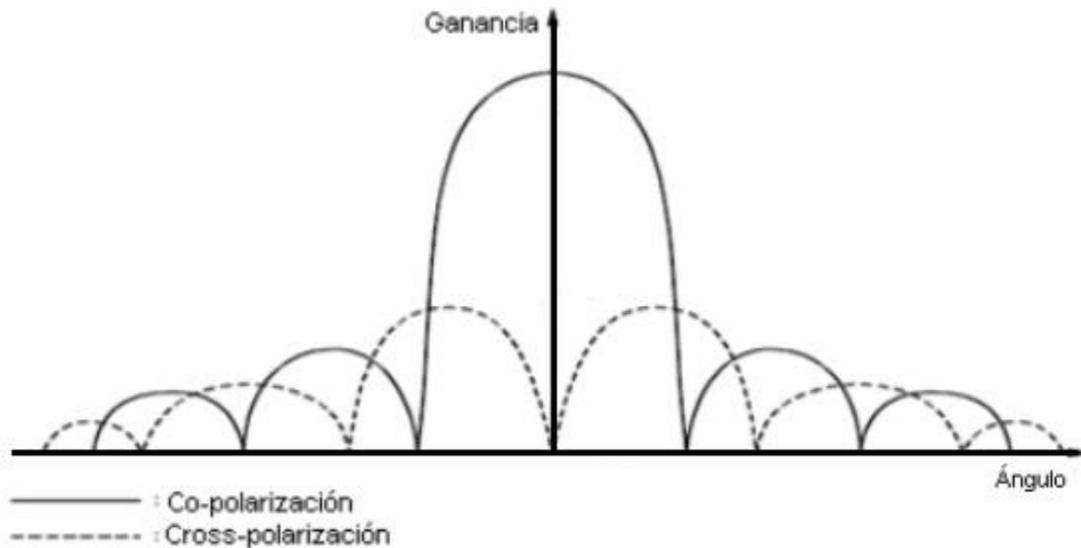


Figura 2-20: Diagrama de radiación para una antena con polarización ortogonal.

Los patrones de radiación, como el mostrado en la Figura 2-20, tanto en la transmisión como en la recepción, diseñados apropiadamente para las antenas de las estaciones terrenas, deben presentar una polarización altamente pura en la dirección de apuntamiento y tener componentes pequeños de polarización cruzada en los lóbulos laterales para evitar interferencias.

En capítulos posteriores, se explicará más a fondo las características necesarias de los patrones de radiación para antenas en bases terrenas, con el fin de evitar interferencias entre sistemas satelitales adyacentes.

2.2.3 Estructura y funcionamiento de los transpondedores

El diagrama de la Figura 2-21, muestra la estructura general de un transpondedor satelital. Se puede observar que los principales pasos del proceso son amplificar las señales a un nivel de potencia adecuado, para que puedan ser recibidas a su regreso con buena calidad, así como cambiarlas de frecuencia, para que salgan por el conjunto de antenas sin interferir con las señales que estén llegando simultáneamente. El subsistema de comunicaciones realiza estas funciones mediante filtros, amplificadores, convertidores de frecuencia, conmutadores y multiplexores, entre otros dispositivos de microondas.

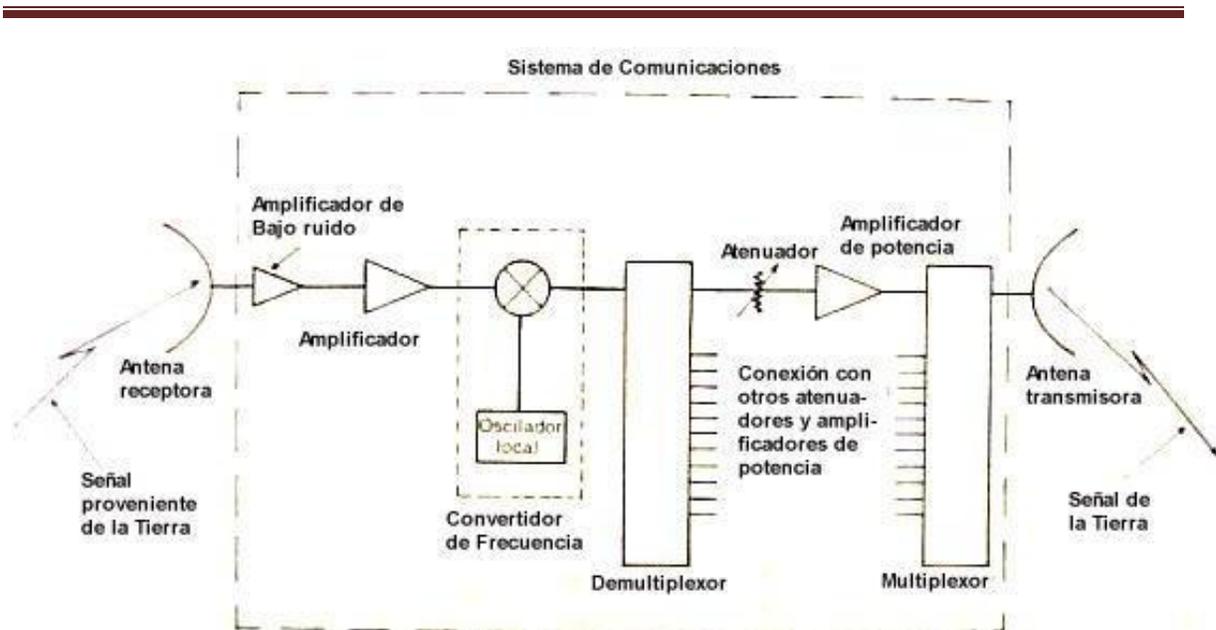


Figura 2-21: Estructura general de un transpondedor satelital.

La importancia del transpondedor reside, más que nada, en las aplicaciones para comunicaciones, ya que de acuerdo al número de transpondedores y a la capacidad de estos, se determina la potencia disponible para ofrecer servicios.

La trayectoria mostrada en la figura es solo un camino, ya que pueden existir diversas estructuras para varios transpondedores dentro de un satélite, además de llegar a compartir algunos equipos, e inclusive, el que más de un transpondedor tenga la misma trayectoria, utilizando conmutadores para realizar el cambio de un elemento a otro. Estas configuraciones están definidas en el diseño y de acuerdo a las necesidades de quien lo utilice.

Las señales provenientes de la Tierra que entran por la antena receptora pueden contener muchos canales de televisión, o miles de canales telefónicos o de datos, todos ellos enviados en frecuencias diferentes; al rango de frecuencias que hay entre la frecuencia más baja y la más alta de las que se transmiten se le da el nombre de ancho de banda. Cuan mayor sea el ancho de banda de un equipo, éste será más eficiente.

Tanto las antenas receptoras, como 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 en las bandas de frecuencia C y Ku. Estas bandas tienen un ancho de banda de operación de 500 MHz para transmisión y 500 MHz para recepción. Existen satélites denominados híbridos, que tienen los equipos necesarios para trabajar simultáneamente en las dos bandas. El uso de dos bandas permite mayor ancho de banda, sin embargo, necesita de mayor número de trayectorias, lo que conlleva a mayor uso de energía eléctrica y en consecuencia más metros cuadrados de células solares para efectuar la conversión suficiente de energía solar en electricidad.

De acuerdo a la Tabla 1, se tiene que la banda C se transmite desde la Tierra en el rango comprendido de los 5.925 y 6.425 GHz, con una frecuencia central de 6.175 GHz. La antena receptora logra recibir estas frecuencias debido a que tiene un ancho de banda mayor de 500 MHz. A partir de aquí el transpondedor modifica la frecuencia de las señales contenidas en ese rango, bajándolas a otro de igual ancho de banda, en este caso al rango de 3.7 a 4.2 GHz. Hecho esto, la señal es transmitida hacia la Tierra por la antena transmisora. A este enlace se le denomina de 6/4 GHz, lo

que indica la frecuencia de subida de 6 GHz y la frecuencia de bajada de 4 GHz. Esta nomenclatura se utiliza para todas las bandas, por ejemplo en el caso de la banda Ku se tiene un enlace 14/12 GHz.

Debido a que las señales tienen un rango de frecuencias de subida y un rango de frecuencias de bajada de 500 MHz, entonces el ancho de banda eficaz es de 500 MHz. Esto representa la capacidad de trabajar con varios canales simultáneamente, por lo que cada canal ocupará un espacio de acuerdo a su ancho de banda en el rango de frecuencias de operación. Por lo tanto, el ancho de banda eficaz se divide en espacios o segmentos, cuyo número depende de la aplicación del satélite. Al hacer una división, se debe dejar un pequeño espacio libre entre segmentos adyacentes para disminuir la posibilidad de interferencia entre las señales que cada uno contiene, a estos espacios se les denomina bandas de guarda. Cada canal corresponde a un transpondedor, y se denominan de acuerdo a su frecuencia central. Para cuestiones prácticas, los transpondedores se numeran siendo el transpondedor 1 el que tiene la frecuencia central más pequeña. La división en segmentos facilita el procesamiento de señales al poder implementar dispositivos que aíslan las señales separando cada canal, y volviéndolos a agrupar para enviarlos de regreso hacia la Tierra. La frecuencia asignada a cada canal se denomina frecuencia de portadora.

Para entender de mejor manera el funcionamiento de un transpondedor se hablará de los principales dispositivos que conforman el sistema a partir de la figura mostrada al principio de esta sección.

2.2.3.1 Amplificador de bajo ruido

Es el dispositivo electrónico que encuentran las señales una vez que son recibidas por la antena. Los amplificadores de bajo ruido son dispositivos de poca potencia de salida, considerados de ganancia unitaria que tienen la función de agregar la menor cantidad de ruido en la primer etapa de amplificación de las señales, esto permite que en las amplificaciones posteriores, la potencia del ruido térmico propio de los dispositivos no llegue a ser comparable con la potencia de la señal recibida. Por lo tanto, se podría decir que la función del amplificador de bajo ruido es tener un SNR (Signal to Noise Rate) lo más grande posible.

Todos los dispositivos generan ruido térmico, principalmente por su calentamiento, sin embargo hay algunos que generan más que otros, por ejemplo los moduladores y demoduladores, por ello antes de entrar en estas etapas, es importante lograr que la relación señal a ruido sea lo más grande posible, siendo que la primera etapa de amplificación es la más importante y en la que más influye el ruido. Lo difícil del diseño de estos amplificadores, reside en que las señales que llegan son muy débiles, por lo que es necesario contar con dispositivos muy sensibles y que generen muy poco ruido para que éste no enmascare la señal recibida y se pierda en el proceso. Claro está, que es necesario tener varias etapas de amplificación que generen poco ruido a la entrada, para alcanzar un nivel adecuado de potencia y así continuar con procesos posteriores.

2.2.3.2 Convertidor de frecuencia

Este dispositivo consiste de un oscilador local que multiplica las señales que entran por otra generada internamente; las señales obtenidas a la salida son similares a las que entraron, con la diferencia de que su frecuencia se ha desplazado hacia frecuencias más bajas en el espectro radioeléctrico.

Una vez que se realiza el desplazamiento en frecuencia, se vuelven a amplificar las señales para, posteriormente entrar en el siguiente dispositivo.

2.2.3.3 Demultiplexor

Este dispositivo se encarga de separar las señales por bloques dependiendo del número de canales en los que se separa el ancho de banda eficaz de operación. En su interior, el demultiplexor cuenta con filtros paso banda que separan las señales en los bloques correspondientes a cada canal. Por ello el demultiplexor cuenta con una entrada y varias salidas.

2.2.3.4 Atenuador

A continuación de cada una de las salidas del demultiplexor, se tienen atenuadores de microondas o resistencias variables; éstas sirven para disminuir a control remoto, y en distinto grado, la intensidad del bloque de señales que entra al siguiente dispositivo.

2.2.3.5 Amplificador de potencia

Se encarga de aumentar la potencia “ignorando” el ruido térmico, lo que interesa es tener la mayor ganancia en una sola etapa de amplificación. Estos dispositivos se encuentran a continuación de los atenuadores.

Teniendo los atenuadores se puede controlar el nivel de la señal de salida de los amplificadores de una mejor manera, esto para evitar saturación en la señal y para tener una amplificación suficiente en cada señal antes de ser agrupadas de nuevo.

Es una etapa muy importante, ya que nos permite controlar la potencia de las señales de tal forma que el uso de la potencia del satélite sea lo más eficiente posible, esto determinará la capacidad del satélite para manejar el mayor número de señales con niveles apropiados de potencia.

Si se llega a amplificar mucho más de lo establecido a las señales, se pueden tener problemas con el ruido de intermodulación, que no es más que las señales adicionales e indeseables producidas por la no linealidad de los amplificadores. 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.

2.2.3.6 Multiplexor

Una vez amplificadas las señales a un nivel apropiado, el siguiente paso es utilizar el multiplexor para agruparlas teniendo únicamente una salida por la que serán enviadas hacia la antena transmisora del satélite.

Además de la configuración mostrada en la figura, existen otras como la opción de utilizar un divisor de potencias a la salida del amplificador de bajo ruido, duplicando el número de demultiplexores y multiplexores y colocando un sumador de potencias a la salida de éstos. Esta configuración alternativa tiene como ventaja 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.

Por último, es importante decir que los dispositivos pueden llegar a fallar, por ello se utilizan sistemas de redundancia, esto permite tener varios aparatos del mismo tipo que puedan suplir a aquellos que llegaran a fallar y así evitar truncar el flujo de la información.

Los subsistemas de antenas y de comunicaciones, son los que más les interesan a los ingenieros en telecomunicaciones, en especial si se trata de satélites dedicados a las comunicaciones, sin embargo es bueno hablar de los demás subsistemas que conforman al satélite, aunque no será necesario entrar en detalle.

2.3 Subsistema de energía eléctrica

Los satélites requieren de un suministro de potencia 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 del modelo y de sus características de operación. Este subsistema consiste de tres elementos:

- Una fuente primaria
- Una fuente secundaria
- Un acondicionador de potencia

La fuente primaria de energía está constituida por un arreglo de celdas solares, las cuales funcionan bajo el principio del efecto fotovoltaico; cuanto mayor sea la densidad de flujo de radiación solar sobre ellas, mayor electricidad generan, aun a pesar de su pobre factor de eficiencia que ronda el 8%. Cada celda solar tiene un área de unos 5 a 8 cm², y uniendo muchas de ellas en serie y en paralelo se forma un arreglo solar.



Figura 2-22: Panel solar de un satélite.

La fuente secundaria está conformada por las baterías electroquímicas. Esta fuente tiene una función muy importante para los satélites, en especial aquellos destinados a las comunicaciones.

Las baterías comienzan a funcionar cuando la fuente primaria, las celdas solares, deja de funcionar, esto es, cuando no tiene línea de vista con el Sol, lo que impide que los rayos solares sean captados por las celdas. Un ejemplo de esto son los eclipses, los cuales tienen una larga duración siendo hasta de 90 días por año. Para el caso de los satélites geoestacionarios, que generalmente son utilizados para comunicaciones, el no tener energía representaría no poder realizar sus funciones, lo cual impediría la comunicación por largos periodos de tiempo, y esto obviamente representaría un grave problema si no se contara con las baterías.

Estos dispositivos de almacenamiento de energía están conectados a un cargador que recibe energía cuando las celdas solares están trabajando, esta energía es suministrada a las baterías las

cuales se cargan mientras las celdas solares estén funcionando. En el momento en que las celdas solares dejan de funcionar, el satélite tiene la función de conmutar la fuente de energía, pasando de la primaria a la secundaria, las pilas comienzan a trabajar y, durante el periodo que dure el eclipse, se descargan permitiendo que el satélite siga funcionando con normalidad. Una vez que el eclipse pasa, se vuelve a realizar un cambio de fuente de alimentación, lo que permite que las baterías se vuelvan a cargar gracias a la energía captada en las celdas solares.

Un parámetro importante en las baterías es la profundidad de descarga (depth of discharge) la cual define el número de ciclos que puede tener una batería, esto es, el número de cargas y descargas que tiene una batería en su vida útil.

Varias décadas han transcurrido en la búsqueda de materiales para el desarrollo de baterías con mayor capacidad y mayor tiempo de vida útil. De entre todas las tecnologías desarrolladas se tienen tres utilizadas en mayor grado:

Batería de Níquel-Cadmio (NiCd): Son las primeras baterías utilizadas en satélites de comunicaciones. Tienen el ánodo en hidróxido de cadmio y el cátodo en hidróxido de Níquel, sumergidos en una solución alcalina (electrolítica) de hidróxidos de potasio, sodio y litio comprimidos. Sus células liberan 1.2 V en la descarga y tienen una buena reputación con respecto a su robustez, rendimiento y vida útil.

Batería de Níquel-Hidrogeno (NiH₂): Estas baterías son el remplazo de las de Níquel-Cadmio, sus ventajas son una mayor energía específica y mayor vida útil. Utilizan gas de hidrógeno en un electrodo de carbón más un cátodo de hidróxido de Níquel. El electrolito utiliza hidróxido de potasio y tienen un separador de cerámica de zirconio. Sus células liberan 1.2 V, además tienen la ventaja de más ligeras y entregan 50% más energía por unidad de masa que las baterías de Níquel-Cadmio.

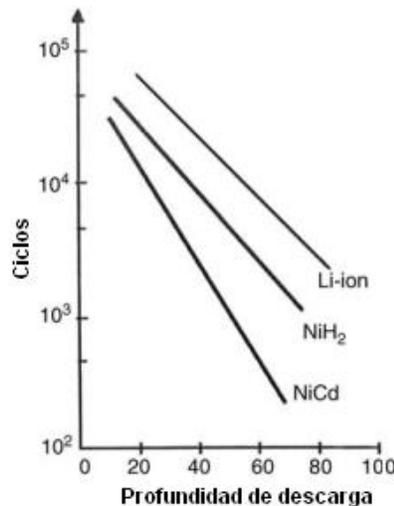


Figura 2-23: Ciclos vs profundidad de descarga.

Baterías de Litio-Ión (Li-ion): La transferencia de iones de litio entre ánodo y cátodo permiten una gran capacidad de ciclos. Esta batería está formada por un ánodo de grafito y un cátodo de litio y metal. Es 50% más ligera que la de Níquel-Hidrogeno y tiene un voltaje de salida superior a los 4.2 V, esto gracias a que no utiliza un medio acuoso como electrolito. El metal utilizado como material activo en el cátodo puede ser de: Óxido de cobalto, óxido de níquel, óxido de aluminio, óxido de manganeso y fosfato de hierro. Su uso requiere tener paquetes de células conectadas en paralelo, bien adaptadas y un sistema de control.



Figura 2-24: Paquete de células de Litio-ión.

Por último, tenemos al acondicionador de potencia, el cual 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.

2.4 Subsistema de control térmico

Las diversas partes del satélite requieren rangos distintos de temperatura para operar eficientemente, por lo que se requiere un equilibrio térmico del conjunto para que dichos rangos se conserven. El calor generado por los amplificadores de potencia, la energía absorbida del Sol y la Tierra por el satélite y demás factores intervienen en el equilibrio y deben considerarse.

La energía proveniente de la Tierra la integran dos tipos de radiación: la propia de ella y la del Sol reflejada por su superficie. La suma del calor generado internamente por el satélite (En especial por el uso de amplificadores de alta potencia TWT) más el producido por la absorción de energía del Sol y la Tierra, menos el radiado por el satélite hacia su interior, se debe mantener lo más constante posible, con pocas variaciones. Debe ser capaz de mantener un equilibrio durante eclipses, en donde el satélite puede enfriarse bruscamente, y de nuevo volverse a calentar al estar nuevamente expuesto a los rayos del Sol. También existe una transferencia de calor externa provocada por radiación y una interna generada entre sus parte por medio de la conducción.

Para lograr un equilibrio térmico, se han diseñado distintos materiales que se utilizan para proteger cada una de las partes del aparato. Por ejemplo, las caras norte y sur de los satélites triaxiales van cubiertas con un reflector óptico de cuarzo, semejante a un gran espejo, que rechaza el calor exterior y al mismo tiempo lo transfiere del interior al vacío; los dispositivos que generan más calor se colocan junto a él, en el interior. Estos espejos actúan como filtros, ya que reflejan las radiaciones de luz visible y ultravioleta provenientes del Sol y permiten el paso de la radiación infrarroja de los aparatos electrónicos hacia el espacio. También se acostumbra proteger a las antenas y demás partes externas con materiales aislantes que les protege del calor o de los cambios bruscos de temperatura. Hay una gran variedad de cobertores, de diferentes colores y materiales, entre ellos krapción, kevlar, mylar, dracón, etc. Dándole al satélite una apariencia extraña.

Los colores juegan un papel 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. Tanto la pintura blanca como elemento frío frente al Sol, como la pintu-

ra negra como elemento caliente, son ejemplos del uso de los colores en el exterior de un satélite. La combinación de materiales y colores, y el auxilio de reflectores ópticos, permiten obtener un equilibrio térmico aceptable la mayor parte del tiempo.

El verdadero problema del equilibrio térmico se presenta durante un eclipse. El satélite sufre un enfriamiento drástico provocado por una modificación de la temperatura resultante total, producto del bloqueo de los rayos del Sol. Esta disminución de la temperatura puede provocar un mal funcionamiento de varios componentes, destacando a las baterías, que son 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 comienza a disminuir de forma significativa. En estos casos, se utilizan los llamados caloductos o tubos de calor, que distribuyen en el interior el calor emitido por los amplificadores de potencia, así como calentadores eléctricos activados por termostatos o a control remoto. Estos caloductos operan bajo el principio de la evaporación y condensación sucesivas de algún fluido en los extremos de un tubo; en el extremo donde está la fuente de calor el fluido se evapora, y en el otro se encuentra un radiador que transmite el calor al exterior del tubo, 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 de forma sucesiva.

2.5 Subsistema de posicionamiento y orientación

Para poder realizar las funciones de comunicaciones, es necesario mantener estable la orientación de la estructura del satélite con respecto a la superficie de la Tierra, para mantener las zonas geográficas de cobertura en servicio, esto se logra por medio de las técnicas de estabilización por giro o de estabilización triaxial.

En la estabilización por giro (Figura 2-25), el satélite gira para conservar el equilibrio del conjunto, al mismo tiempo que las antenas permanecen orientadas hacia la Tierra. En algunos casos las antenas también giran, pero en sentido contrario al giro del satélite, con lo que parece que éstas no se mueven viéndolas desde la Tierra. Con el tiempo, los sistemas de estabilización por giro han evolucionado, y hoy solo una parte del cuerpo de los satélites gira mientras que el resto de la estructura 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.

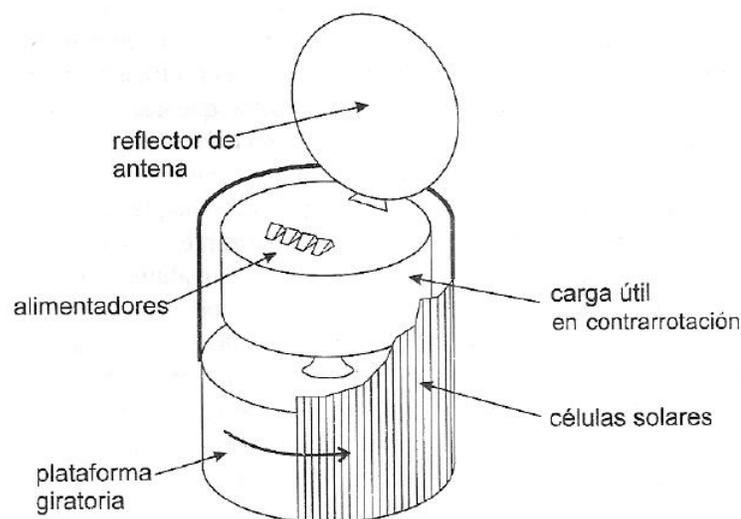


Figura 2-25: Satélite con estabilización por giro.

En la estabilización triaxial (Figura 2-26), los satélites no giran. 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.

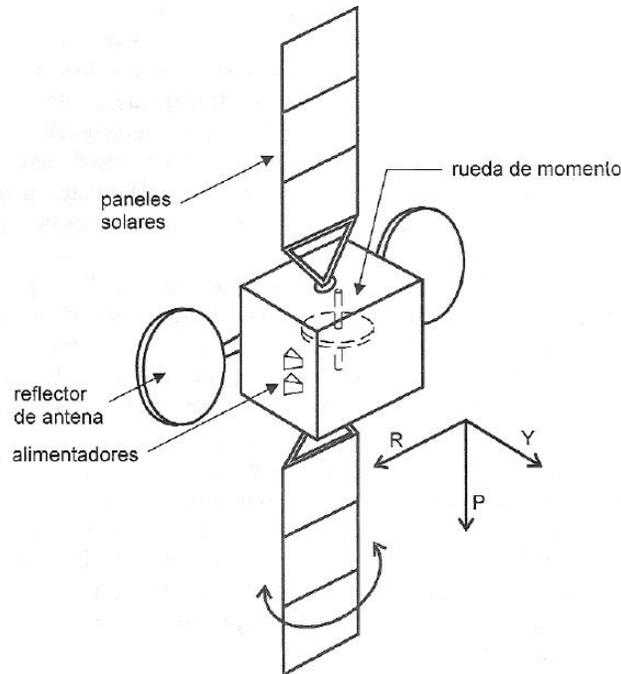


Figura 2-26: Satélite con estabilización triaxial.

Las fuerzas perturbadoras del espacio no dejan de mover al satélite sobre su órbita y en su orientación con respecto a la Tierra. Por lo que es necesario determinar, en todo momento, dónde está el satélite y cuál es su orientación. Para ello es necesario conocer la distancia a la que se encuentra y en qué dirección o ángulo con relación a un punto de referencia sobre la Tierra.

La distancia se mide transmitiendo una señal piloto hacia el satélite, que éste retransmite después, y la diferencia que se detecta en el centro de control entre las fases de la señal transmitida y recibida, junto con el tiempo de retraso, es un indicador de la distancia que se tiene entre el satélite y el centro de control.

El ángulo o dirección se mide por medio de interferometría, empleando dos estaciones separadas por cierta distancia y comparando las señales piloto recibidas por cada una de ellas. Otra técnica para medir el ángulo es la de máxima recepción, y tiene la ventaja de que sólo requiere una estación terrestre y no dos; opera bajo el principio de orientar una antena hacia el satélite e ir la moviendo poco a poco hasta que se detecte el nivel máximo de radiación. Cuando se obtiene la posición máxima de recepción se considera que la antena de la estación terrena está perfectamente orientada hacia el satélite, y por lo tanto se puede conocer la dirección o ángulo en que éste se encuentra. Sin embargo, el método de interferometría es más preciso, aunque en lo económico, es preferible utilizar el segundo método.

Para la determinación de la orientación del satélite con relación a la superficie terrestre se pueden utilizar sensores tales como, los de Sol, de Tierra y de RF. También existen sensores estelares, que son muy precisos, pero más pesados, y generalmente se evitan.

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. Ésta dirección se relaciona con la deseada respecto a la Tierra, esto permite medir el ángulo entre la dirección en la que se halla el Sol y uno de los ejes del cuerpo del satélite. Son utilizados en especial, durante la colocación del satélite en órbita, debido a la dificultad de utilizar a la Tierra como referencia.

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 pila. La cantidad de calor que reciben estos dispositivos depende de la orientación con relación a la superficie terrestre. Las mediciones deben de ser muy precisas debido a la gran distancia entre los satélites y la Tierra, por lo que el diseño y la fabricación de los sensores implica una tecnología muy avanzada, siendo un diseño más sencillo para los satélites estabilizados por giro que para los satélites triaxiales, ya que éstos no se mueven regularmente con relación a la Tierra y sus sensores tienen que hacer su propio barrido.

En la actualidad se cuenta con sensores más precisos. Los sensores de radiofrecuencia (RF) 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.

La corrección de la posición y orientación se realiza por medio de un actuador o conjunto de actuadores montados en el satélite a partir de la información procesada por el subsistema de rastreo, telemetría y comando, aunque una buena parte del procesamiento y generación de acciones correctivas se lleva a cabo por una computadora a bordo.

Entre los tipos de actuadores se tiene los volantes estabilizadores o giroscopios, cuya velocidad de rotación se puede cambiar para producir un par de corrección. También se cuenta con 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. Por último, en dado caso que las correcciones tengan que ser a gran escala, se utilizan los propulsores, ya que los otros actuadores solo sirven para correcciones pequeñas debido a los pares generados, por lo que es necesario hablar más a fondo sobre los propulsores.

2.6 Subsistema de propulsión

Éste subsistema opera 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. La eficiencia de un propulsor se caracteriza por su empuje y el impulso específico del propelente que utilice. El impulso específico se define como el empuje producido por cada unidad de peso del propulsante que se consume cada segundo. Es de esperarse que si se desea reducir al mínimo posible el peso total del combustible almacenado en el satélite, para economizar los costos del lanzamiento, es deseable utilizar propulsores que funcionen con combustible de impulso específico muy alto.

Los satélites estabilizados por giro sólo necesitan cuatro propulsores pequeños situados sobre la sección giratoria; dos son radiales y los otros dos son axiales, con relación al cilindro giratorio. En cambio, los satélites triaxiales, al no tener estabilidad propia por giro, requieren de un mayor número de propulsores; típicamente llevan 12, distribuidos en las caras norte, sur, este y oeste de la caja central del aparato.

Los niveles de empuje proporcionados por los propulsores de un satélite triaxial no deben ser demasiado grandes para evitar perturbaciones fuertes en la orientación del aparato durante el encendido, por lo que deben ser orientados con suavidad. En contraparte, los satélites estabilizados por giro son rígidos y tienen una inercia giroscópica grande, y necesitan altos niveles de empuje para lograr cambios de orientación. Por ello el empuje de los satélites de estabilización de giro y triaxiales son de 22 Newtons y de 10 a 22 Newtons respectivamente.

Hay propulsores químicos y eléctricos, pero los primeros son los de mayor uso porque proporcionan niveles de empuje mucho más grandes que los eléctricos.

Los propulsores químicos trabajan a través de 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, pero debido a su impulso específico bajo, fue necesario buscar otro propulsante. La hidracina (N_2H_4) monopropelente fue la solución. La hidracina es inyectada en una cámara donde se pone en contacto con un catalizador llamado iridio; como resultado, la hidracina se evapora y se descompone exotérmicamente en una mezcla de hidrógeno y amoníaco, a temperaturas mayores a $300^\circ C$ y con un impulso específico 3 veces mayor que el obtenido con el peróxido de nitrógeno. Y si se utiliza un sistema de calentamiento resistivo que aumente la temperatura entre el proceso de descomposición catalítica y escape, hasta unos $1900^\circ C$, el impulso específico puede aumentar hasta 4 veces más que con los primeros propulsante. Este incremento permite reducir la masa de propulsante en el satélite, pero a costa de un consumo mayor de energía eléctrica, pues hay que calentar la cámara de catalización.

Hay q recordar que las correcciones a lo largo de la vida útil del satélite consumen cerca del 95% del combustible total, y se debe guardar un poco para el final de la vida útil, para impulsar al satélite a una órbita más alta. Los tanques de almacenamiento son fabricados con acero inoxidable o titanio y además la hidracina contiene un gas que la va empujando por efecto de presión hacia las válvulas de alimentación de las cámaras de catalización; el gas presurizador puede ser nitrógeno o helio, estos factores provocaron que se comenzarán a usar los sistemas bipropelentes o bipropul-santes.

El sistema bipropelente no emplea catalizador, sino que dos propulsantes distintos, un combustible y un oxidante, que se ponen en contacto para la reacción química de combustión sin ninguna necesidad de algún sistema de ignición; de éstas sustancias, las más populares son la hidracina monometílica (MMH) y el tetróxido de nitrógeno (N_3O_2) que al combinarse producen un gran impulso específico. El gas que se obtiene como producto es una mezcla de agua, nitrógeno, bióxido de carbono, monóxido de carbono e hidrógeno. La ventaja que ofrecen estos propulsores es que permiten diseñar un sistema unificado de propulsión que a la vez sirva para colocar el satélite en su órbita definitiva, así como realizar maniobras de corrección y posición durante todos sus años de vida útil, utilizando para ello los mismos tanques de almacenamiento de combustible; normalmente se usa helio como gas presurizador. Esta versatilidad conlleva a 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, pero es un diseño más complejo y redundante.

El motor de apogeo es aquel que genera los impulsos y cambios de velocidad necesarios para pasar de la órbita de transferencia a la geoestacionaria. Cuando el satélite llega a su posición de tra-

bajo, le queda cerca del 20% de propelentes en los tanques del sistema, y con él debe efectuar sus maniobras correctivas de posición y orientación durante su tiempo de vida útil. Para algunas correcciones pequeñas, como aquellas de norte-sur, algunos satélites utilizan propulsores eléctricos a base de iones de xenón, conocidos como sistemas de propulsión combinados. Sin embargo, también existen satélites que cuentan exclusivamente con propulsores eléctricos para todas las maniobras en órbita.

Los propulsores eléctricos hacen uso de potencia eléctrica para acelerar algún propelente por medio de un proceso electrotérmico, electrostático o electromagnético. Requieren poca masa para efectuar un gran empuje, su propelente suele ser expulsado con una velocidad casi veinte veces mayor que un propulsor químico y generalmente utilizan como propulsor algún gas raro como el xenón o el argón, algún metal líquido como el cesio o indio, o bien, en algunos casos, la convencional hidracina o sustancias similares como el amoníaco y el nitrógeno. Tienen la desventaja de requerir gran cantidad de energía eléctrica, sin embargo, los satélites actuales son capaces de generar potencias de más de KW de disponibilidad.

Los propulsores electrotérmicos no son otra cosa que versiones mejoradas del propulsor químico, en los cuales el impulso específico es aumentado por calentamiento. Ejemplos de estos propulsores son los resistivos de hidracina con calentamiento óhmico y los propulsores de hidracina con arco eléctrico, de mayor complejidad y consumo de potencia que pueden generar el doble de impulso específico que los propulsores resistivos.

Los propulsores electrostáticos, al igual que los electromagnéticos, aceleran materiales ionizados o plasma. Se caracterizan por empujes bajos con altos impulsos específicos y altos requerimientos de potencia eléctrica, por ello el tiempo que deben estar encendidos es mucho mayor que el de un propulsor químico convencional. Los propulsores electrostáticos pueden ser de efecto Hall, iónicos de rejilla o de emisión de campo.

Los propulsores de efecto Hall usan un gas de presión baja por el que pasa una descarga eléctrica entre dos electrodos; un campo magnético radial genera una corriente de efecto Hall que interactúa con el campo magnético original, y esto crea una fuerza sobre el propelente en la dirección de escape.

Los propulsores iónicos de rejilla o de plasma, expulsan partículas cargadas eléctricamente a grandes velocidades. Generalmente tienen un diámetro del orden de 15 a 25 cm. El empuje es producido al acelerar los iones positivos a través de una serie de electrodos en forma de rejilla, que están en uno de los extremos de la cámara del propulsor; los electrodos crean más de 3 000 haces de empuje sumamente finos, y, para evitar que éstos sean atraídos de regreso eléctricamente, por ser del mismo signo, se usa un “neutralizador”, que no es más que un dispositivo externo emisor de electrones; mientras mayor potencia eléctrica se aplique, los iones se mueven más rápido, y esto resulta en un mayor empuje.

Los propulsores de emisión de campo funcionan bajo el principio de ionizar y acelerar metales líquidos tales como el cesio, rubidio o indio.

Tanto los propulsores de efecto Hall como los iónicos de rejilla tienen como principal función efectuar las correcciones norte-sur o de balanceo del satélite dentro de su ventana de posicionamiento. Mientras que los propulsores de emisión de campo, que producen empujes muy bajos, se utilizan para correcciones finas de apuntamiento de satélites científicos, como telescopios y observa-

torios. Por ello, para telecomunicaciones, los electrostáticos de mejor aplicación son los iónicos de rejilla y los de efecto Hall.

Los propulsores electromagnéticos son aquellos que utilizan teflón como elemento de expulsión. Los electromagnéticos de plasma pulsante tienen la forma de un capacitor que lleva una barra de teflón sólida colocada entre dos electrodos; el capacitor se carga hasta que la diferencia de voltaje provoca una chispa a través de la superficie de la barra; esto causa que una capa pelicular del teflón se ionice y dicho plasma es acelerado por el campo electromagnético propio del capacitor; el capacitor se descarga y tiene que ser recargado nuevamente. Su potencia eléctrica es baja, sin embargo genera una milésima parte del impulso específico de un propulsor por hidracina. En el caso del propulsor magnetoplasmadínámico (MPD) el plasma contiene una corriente que interactúa con el campo magnético, y esto resulta en una aceleración de Lorentz que expulsa al plasma por la tobera.

2.7 Subsistema de rastreo, telemetría y comando

Se encarga de la operación y posición del satélite a control remoto por medio del envío de órdenes para su ejecución en diversos subsistemas del satélite. El equipo de telemetría cuenta con diversos tipos de sensores instalados en cientos de puntos de prueba, que miden cantidades tales como voltajes, corrientes, presiones, potencia de salida de amplificadores, posición de interruptores y temperaturas, etc. Las lecturas obtenidas son convertidas en señales digitales y enviadas hacia la Tierra.

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 seis a siete tonos distintos, cuya frecuencia es de unos cuantos kHz, y que modulan sucesivamente en fase a la señal portadora de la estación terrena; el satélite recupera los tonos y los demodula con ellos a su propia portadora, para retransmitirlos hacia la Tierra en donde son detectados por el centro de control. Las diferencias de fase entre la señal transmitida y la señal recibida permiten calcular la distancia a la que se encuentra el satélite con respecto a la estación terrena con una gran precisión.

Para la transmisión de éstas señales, se utiliza por lo general una antena omnidireccional en especial, que durante el transcurso de la vida útil del satélite está conectada a un mismo amplificador a bordo del satélite. La información es digitalizada, multiplexada con TDM y transmitida a la Tierra en formato PCM. Son señales de poco ancho de banda por lo que no es necesario utilizar un transpondedor exclusivo para estas señales, sino que se utiliza uno cualquiera de los utilizados para dar servicios, utilizando el mismo amplificador que cualquiera de las señales de comunicaciones con las que trabaje el satélite.

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 extender los paneles solares, mover las antenas y encender el motor de apogeo. Todas estas señales van codificadas y cifradas. Los satélites modernos también cuentan con un procesador de control a bordo, que internamente genera determinados comandos para realizar funciones autónomas.

2.8 Subsistema estructural

La estructura del satélite es el almacén 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. 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 de los propulsores y esfuerzos mecánicos. Y cuando llega a su posición en la órbita final, 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. Por ello cada una de las demás partes que lo componen debe ser diseñada para que soporte esas condiciones durante la colocación en órbita y el tiempo esperado de vida.

Los diseñadores de satélites tienen a su alcance diversidad de materiales para fabricar la estructura, así como muchos conceptos geométricos derivados de la experiencia obtenida en aeronáutica e ingeniería espacial 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 tanto su utilización es limitada. Dependiendo del diseño la masa de la estructura puede variar entre 10% y 20% del total de la masa del satélite; una buena parte de la estructura se fabrica con “panal de abeja” de aluminio, por su ligereza y rigidez excelentes.