

## Capítulo 3 Estaciones Terrenas

Hasta el momento se ha explicado qué es y cómo está construido un satélite, sin embargo, para que este pueda lograr el fin por el que fue construido, es necesario establecer un enlace con una estación en tierra conocida como estación terrena, y tiene el objetivo de permitir una comunicación directa con el satélite para mandar o recibir información.

Estas estaciones consisten de una serie de equipos interconectados entre sí con una antena o un conjunto de antenas, que puede tener un extremo de entrada y salida de señales de comunicación en banda base o en frecuencia intermedia y otro de transmisión y recepción de radiación hacia y desde uno o más satélites. Por ellos realiza funciones como la modulación, demodulación, conversión de frecuencias, codificación, multiplexación, conversión analógico-digital, etc. Además, algunos tipos de estaciones terrenas solo tienen la capacidad de transmitir o recibir y pueden ser el punto de origen o final de señales o estar enlazadas también por medio de redes terrenales con sitios distantes de origen y destino. Por ello la designación de estación terrena es utilizada indistintamente para indicar todo equipo terminal que se comunica desde la Tierra con un satélite, sin importar si está fijo en algún punto, o si está instalado en un barco, avión, o cualquier vehículo terrestre como un autobús, un auto o un camión de carga.

Una estación terrena consta de 4 bloques o subsistemas principales que organizados tienen la estructura mostrada en la figura.

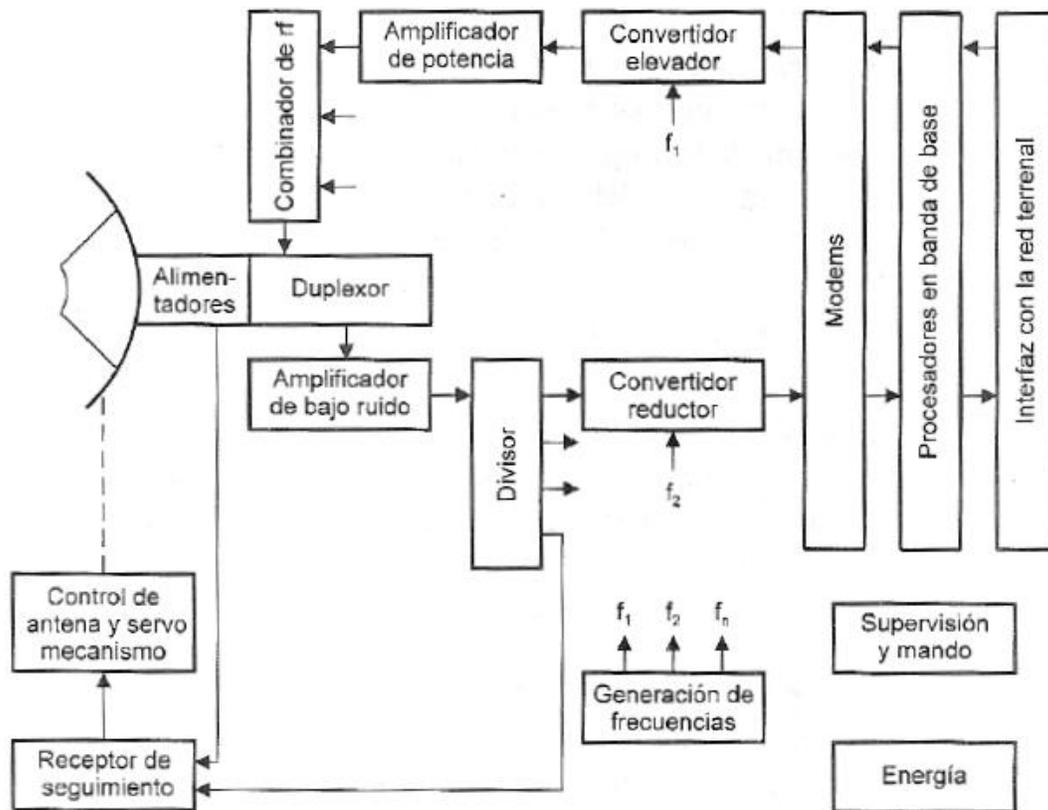


Figura 3-1: Estructura general de una estación terrena.

---

### 3.1 Subsistema de antena

Las antenas utilizadas en estaciones terrenas deben tener ciertas características que permitan un correcto enlace con el satélite deseado, estas son:

- Alta directividad, en la dirección de la posición nominal del satélite.
- Baja directividad en las demás direcciones, en especial en las cercanas al satélite.

Éstas dos características requieren el uso de antenas directivas, por ello es que se utilizan solo antenas de apertura para las estaciones terrenas con configuraciones como las explicadas con anterioridad en el tema de subsistema de antenas de los satélites.

En cuanto al patrón de radiación, debe tener lóbulos laterales con niveles bajos, de modo que sea minimizada cualquier posible interferencia con otros sistemas de microondas, sean terrestres o satelitales. Así que dichos patrones deben cumplir con ciertos requerimientos mínimos establecidos por agencias regulatorias.

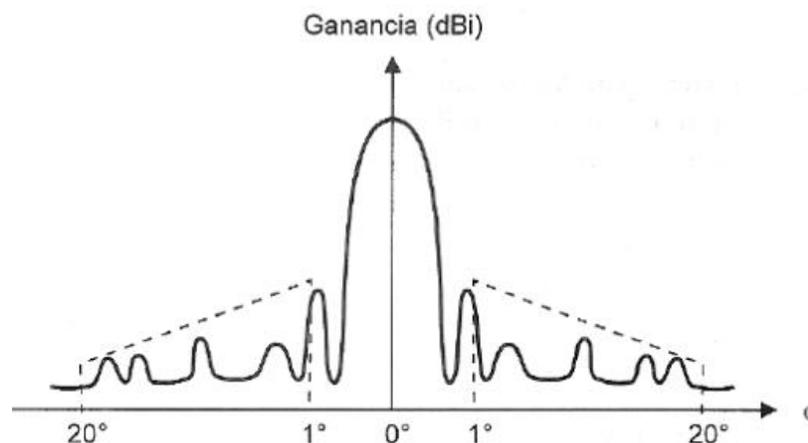


Figura 3-2: Patrón de radiación que muestra las limitaciones de lóbulos laterales de una antena de estación terrena.

- Ganancia y eficiencia de la antena lo más grandes posibles para las frecuencias tanto de bajada como de subida.

Como se explicó anteriormente, la ganancia de una antena determina tanto la potencia de salida al transmitir, utilizando una frecuencia de subida (uplink), como la sensibilidad en la recepción de señales con frecuencia de bajada (downlink), por ello es importante que sea alta debido a que las señales viajan muchos kilómetros para llegar a su destino.

Entre los factores que afectan a la eficiencia total de la antena se encuentran el desbordamiento del reflector, el gradiente de iluminación no uniforme, pérdidas óhmicas y ondas estacionarias, obstrucción causada al reflector por el alimentador y su soporte o por el subreflector si es el caso, irregularidades de la superficie del reflector y polarización cruzada por acoplamiento a la polarización ortogonal.

- Aislamiento entre señales con polarizaciones ortogonales.

Esto asegura que en la recepción tanto en las antenas de los satélites como en las antenas de las bases terrenas, se puedan separar señales con polarizaciones ortogonales, permitiendo un correcto funcionamiento cuando se realiza un reúso de frecuencias por este método.

- La menor temperatura de ruido posible en la antena

La temperatura de ruido de la antena de una estación terrena se integra partir de la temperatura de ruido proveniente de cada dirección del espacio y de la Tierra, ya que además de captar el ruido de lóbulo principal recibe ruido por los lóbulos laterales y el posterior. Se reciben el ruido de fondo cósmico de aproximadamente 2.8 K, el ruido de la Tierra típicamente de 290 K en diversos lóbulos laterales y el producido por la tropósfera en cielo despejado. También puede existir ruido por conceptos de pérdidas óhmicas que llega a ser de 7 K adicionales. Por último, es importante considerar la variación del ruido con respecto al ángulo de elevación de la antena, la Figura 3-3, muestra los valores característicos de ésta relación.

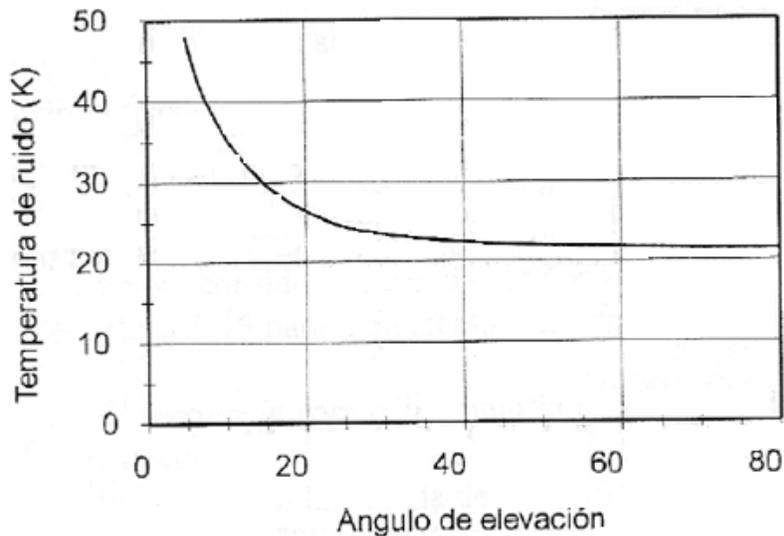


Figura 3-3: Temperatura de ruido vs Ángulo de elevación.

El Sol y la Luna aumentan considerablemente la temperatura de ruido de la antena en los intervalos de tiempo en que inciden sobre el lóbulo principal o los lóbulos secundarios mayores. La temperatura de ruido que produce el Sol cuando incide en el eje principal de una antena, cuya anchura de haz sea  $0.5^\circ$  o menor es extraordinariamente alta e impide toda comunicación; Su efecto cuando el haz es mayor a  $0.5^\circ$  disminuye exponencialmente. En el caso de los sistemas geoestacionarios los intervalos en que ocurre la interferencia del Sol dependen de la ubicación geográfica de las estaciones terrenas que tengan antenas de alta ganancia, de la posición del satélite en la órbita y de la combinación de movimientos de la Tierra respecto del Sol, por lo que se presenta en 2 periodos anuales de 21 días cada uno durante los equinoccios o cerca de ellos. Cada interferencia puede durar minutos y ocurre a cada antena en distinto intervalo de tiempo, siendo el número de días de afectación en cada periodo aproximadamente 5 veces la anchura del haz de la antena en grados.

- Limitación, lo más posible, de efectos provocados por condiciones meteorológicas locales.
- Apuntamiento continuo en dirección del satélite con la precisión requerida.

El sistema de montaje de la antena debe permitir cuando menos un movimiento de ajuste mínimo para el apuntamiento hacia el satélite en el proceso de instalación que incluye algunas pruebas para recepción y en el caso de estaciones con capacidad de transmisión las necesarias para obtener autorización de acceso. Obviamente las antenas que necesitan reapuntarse con frecuencia o

---

deben operar con satélites que no utilizan la órbita geoestacionaria requieren de mecanismos que permitan realizar movimientos con la facilidad que le caso haga necesario, ya sea manualmente o por medios automáticos.

Para realizar los ajustes necesarios y poder recibir y/o transmitir adecuadamente, el subsistema de antenas se conforma como se muestra en la Figura 3-4.

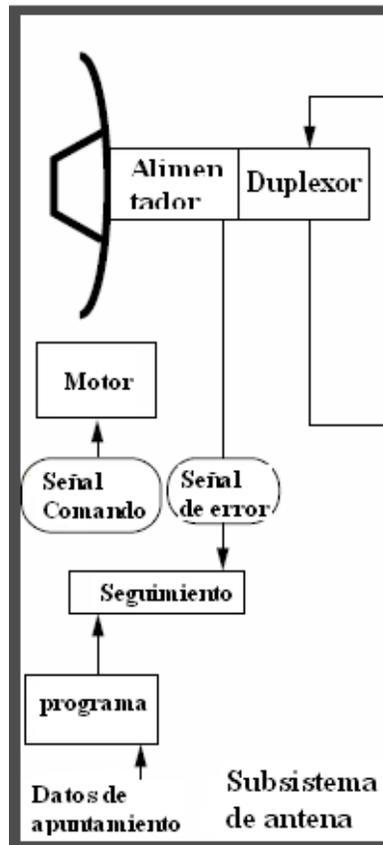


Figura 3-4: Subsistema de antena.

Para la instalación y funcionamiento de una antena que se enlazará con un satélite geoestacionario, se definen 3 conceptos importantes:

- Orientación
- Montaje
- Rastreo

### 3.1.1 Orientación

La orientación de la antena de una estación terrena hacia un satélite geoestacionario es realizada ajustando dos ángulos, en elevación y acimut. Estos ángulos son medidos tomando como referencia a la línea sobre la cual la antena tiene ganancia máxima, y en el caso de una antena parabólica, dicha referencia es el eje del plato parabólico. El ángulo de elevación  $\theta$  se define como el ángulo formado por el plano horizontal local y la línea de vista entre la estación terrena y el satélite (Figura 3-5).

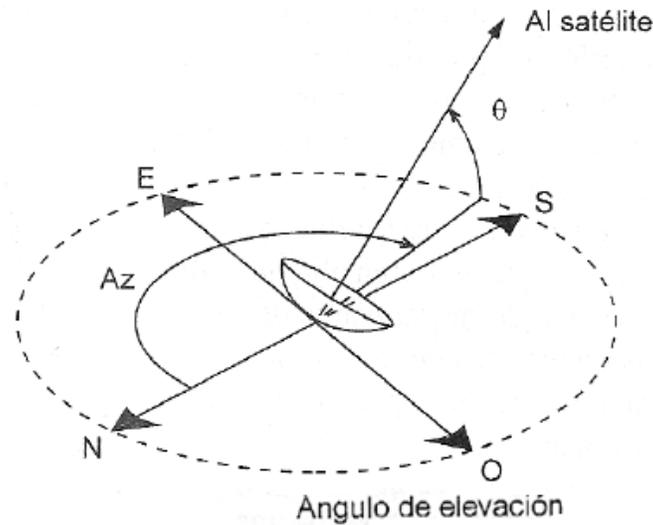


Figura 3-5: Ángulos de Acimut y elevación de la antena de una estación terrena.

Tanto el valor del ángulo de elevación como el ángulo de acimut dependen de las coordenadas geográficas de la estación terrena y de la posición orbital del satélite. Las coordenadas geográficas son la latitud y la longitud.

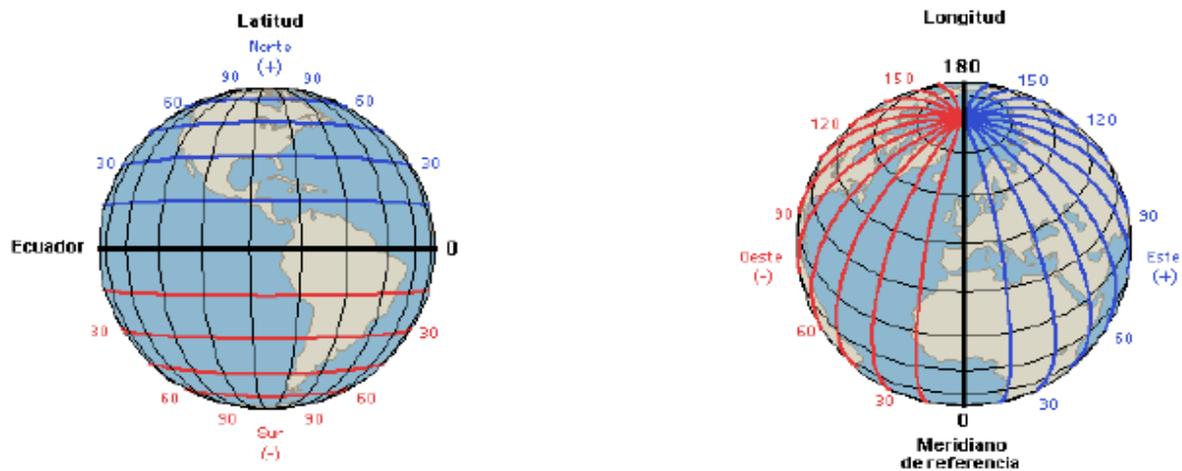


Figura 3-6: Longitud y latitud.

La longitud geográfica es el ángulo, en el plano ecuatorial, entre el meridiano de referencia (Meridiano de Greenwich) y el meridiano de la ubicación, en este caso particular, de la base terrena. Toma valores positivos hacia el este de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

La latitud geográfica es el ángulo vertical entre la ubicación de la estación terrena y el plano del ecuador, expresado en grados de  $-90^\circ$  (Polo Sur) a  $+90^\circ$  (Polo Norte).

El ángulo de acimut  $\varphi$  es el ángulo medido en el sentido de las manecillas del reloj entre la línea que une a la estación terrena con el norte geográfico y la proyección horizontal local de la línea de máxima radiación de la antena, que debe apuntar en la dirección hacia el satélite.

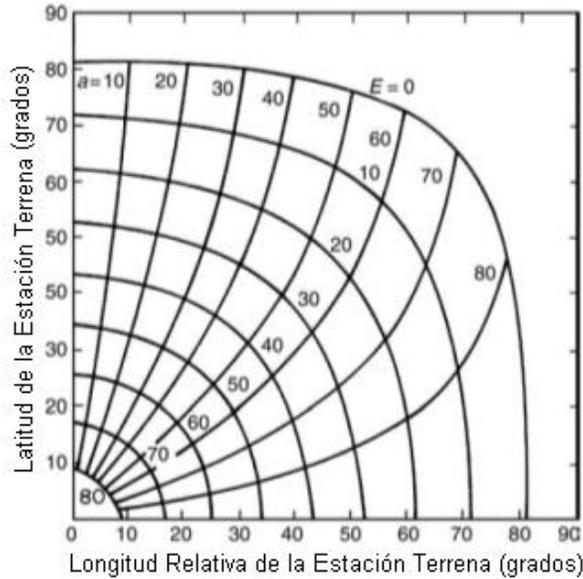


Figura 3-7: Relación entre la longitud relativa y latitud de una estación terrena.

Para el cálculo tanto del acimut, como del ángulo de elevación se usa la familia de curvas presentada en la Figura 3-7.

Para calcular el ángulo de elevación se utiliza:

$$\theta = \text{angtan} \left\{ \frac{(\cos l)(\cos \Delta L) - \frac{R_e}{H}}{\sin[\text{angcos}(\cos l \cos \Delta L)]} \right\}$$

Donde:

$l$  = Latitud de la estación terrena

$\Delta L$  = | Longitud del satélite – Longitud de la estación terrena |

$R_e$  = radio de la Tierra = 6,378 km

$H$  = radio de la órbita geoestacionaria = 42,164 km

Y para el acimut:

$$\phi' = \tan^{-1} \left[ \frac{\tan \Delta L}{\sin l} \right]$$

Dependiendo de la localización de la estación terrena con relación al satélite, el ángulo de acimut será:

$\phi = 180^\circ - \phi'$  Estación en el hemisferio norte y al oeste del satélite.

$\phi = 180^\circ + \phi'$  Estación en el hemisferio norte y al este del satélite.

$\phi = \phi'$  Estación en el hemisferio sur y al oeste del satélite.

$\phi = 360^\circ - \phi'$  Estación en el hemisferio sur y al este del satélite.

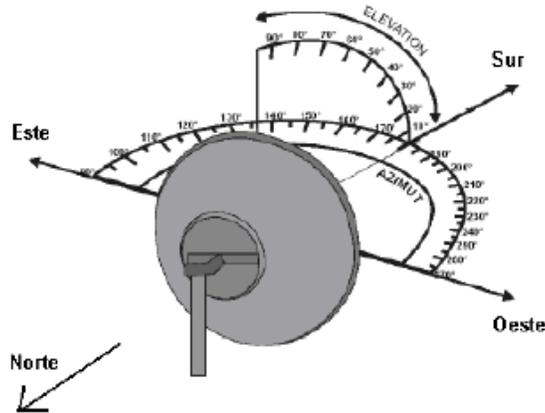


Figura 3-8: Acimut y elevación de una antena de base terrestre.

### 3.1.2 Montaje

Los desplazamientos del satélite y el tipo de la estación terrestre (fija o móvil), así como su posición geográfica, sus aplicaciones y las necesidades que se tengan para pruebas y mantenimiento frecuentes, determinan la estructura del montaje que la antena (cuando es directiva) debe tener.

Existen tres tipos de montaje cuya forma de funcionamiento se muestra esquemáticamente en la Figura 3-9.

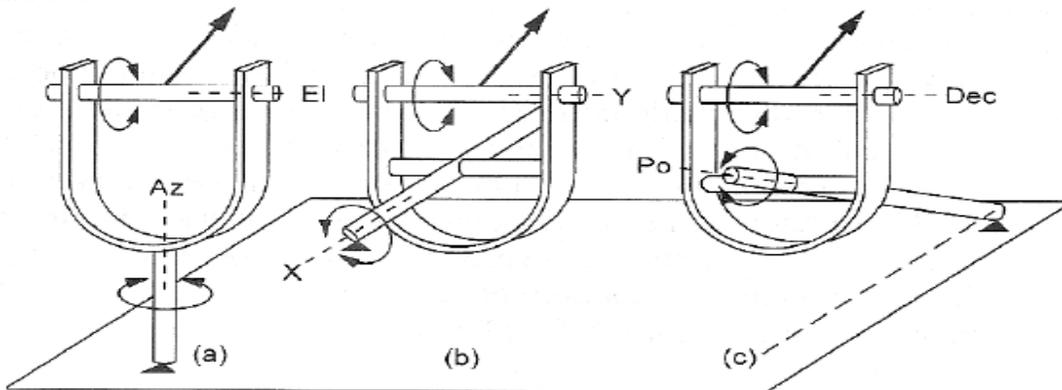


Figura 3-9: Tipos de montaje.

- a) Montaje elevación-acimut (El-Az): En este montaje la antena tiene su eje primario fijo en la dirección vertical, y al girar alrededor de él se efectúan los cambios del ángulo de acimut; su eje secundario es horizontal y con él se orienta la antena en elevación. El montaje es sencillo y tiene la ventaja de que sólo el giro en elevación puede producir deformaciones en la geometría de la antena debida a su peso. La mayoría de las antenas que requieren gran precisión de la antena o gran libertad de movimiento utilizan este montaje, como las empleadas para el seguimiento de satélites en órbita de transferencia, pero por lo general no puede apuntar muy cerca del cenit.
- b) Montaje X-Y: Tiene su eje primario colocado horizontalmente, y el eje secundario es perpendicular a él. La configuración es práctica para rastrear con facilidad a un satélite cuando éste pasa por el cenit, puesto que se evita hacer desplazamientos de la antena tan rápidos como los que sí se necesitarían hacer con el montaje El-Az; pero resulta inadecuado para rastrear satéli-

---

tes en el horizonte. En general, el montaje X-Y es más apropiado para las antenas que se comunican con satélites de órbita baja que con satélites geoestacionarios.

- c) Montaje ecuatorial: Tiene su eje primario (horario) paralelo al eje de rotación de la Tierra, y el secundario es un eje perpendicular de declinación; como el eje primario es paralelo al eje polar de la Tierra, a este montaje se le llama polar. Normalmente se usa para montar radiotelescopios, pues permite que la antena siga a un objeto celeste con sólo girarla sobre su eje horario. La ventaja del montaje polar para los sistemas geoestacionarios de poder mantener fijo el ajuste de declinación y solo tener movimiento sobre el otro eje no puede aplicarse a estaciones terrenas grandes, porque aunque la antena apunte con gran precisión a la órbita, debido a lo agudo de su lóbulo principal, los movimientos del satélite ocasionarían pérdidas de consideración y por tanto requieren sistemas de seguimiento con movimiento en dos ejes., por esta razón es que se utilizan los otros dos tipos de montaje para satélites no solo geoestacionarios, sino también de órbitas bajas.

### 3.1.3 Rastreo

Cuando es necesaria la reorientación ocasional hacia otros satélites o el seguimiento de un satélite geoestacionario operando en órbita inclinada, es común el empleo de motores que se controlan remotamente o se programan para un movimiento previsto. Cuanto más angosto sea el ancho del haz de la antena, y ésta esté más cerca del ecuador, el apuntamiento se vuelve más importante, en especial si el satélite está directamente “encima” de la estación. En cambio, si la estación está en una latitud alejada del ecuador, la amplitud de los movimientos del satélite tiene un impacto menor en los ajustes necesarios de la orientación de la antena para seguirlo. Si el ancho del haz de la antena es mucho más grande que la ventana del satélite, entonces no necesita un sistema de rastreo, por el contrario, si se necesita apuntar con una precisión del orden de  $0.01^\circ$  para mantener la comunicación fiable, es recomendable utilizar un sistema de rastreo que no permita una diferencia en el ángulo mayor a la establecida. Existen dos tipos de sistemas de rastreo, el preprogramado y el automático, este último se divide en rastreo por pasos y rastreo monoimpulso.

Rastreo preprogramado: Consiste en determinar con anticipación los movimientos del satélite y programar acordemente el mecanismo de orientación de la antena de la estación terrena para que lo siga. El satélite no se mueve arbitraria o aleatoriamente, sino de acuerdo con la influencia de las fuerzas perturbadoras en el espacio; por lo tanto, con programas de computadora, sus movimientos y las efemérides de su órbita pueden ser predichos. Esta técnica se utiliza en estaciones medianas en sistemas nacionales.

Rastreo por pasos: También conocido como de ascenso. A intervalos regulares, la antena detecta la intensidad de una señal guía (radiobaliza o radiofaro) emitida por el satélite; a continuación gira un poco (da un paso) alrededor de uno de sus ejes de montaje y compara la intensidad de la señal recibida con la anterior; si el nivel de la señal baja, entonces se mueve ahora en dirección opuesta, y si aumenta en ese sentido, continua dando pasos hasta detectar el nivel máximo. Se utiliza en estaciones medianas, estaciones grandes y estaciones de barcos.

Rastreo monoimpulso: Es el más preciso y fiable para las antenas grandes, especialmente si funcionan en las bandas Ku y Ka. Su forma de operación proviene de la tecnología del radar, pues ahora la búsqueda es por un nivel mínimo de recepción de la señal guía, y para esto la antena parabólica necesita un alimentador especial. Los primeros diseños de sistemas monoimpulso utilizan cuatro antenas de bocina colocadas simétricamente alrededor del foco geométrico de la parábola; éstas reciben simultáneamente la señal guía o radiobaliza emitida por el satélite y las detecciones

---

de las cuatro son comparadas para determinar señales de error en el apuntamiento y efectuar las correcciones necesarias. Su inconveniente es que conducen al uso de alimentadores aparatosos y complicados. Así que los sistemas más modernos, conocidos como monoimpulso multimodo, solamente utilizan un acoplador especial de microondas que va insertado en el mismo alimentador primario o corneta de la antena parabólica; cuando hay una desviación en la orientación de la antena en relación con la señal guía del satélite, el acoplador extrae del alimentador señales de propagación de modo superior que permiten determinar el error de apuntamiento y efectuar, en consecuencia, las correcciones que sean requeridas.

### 3.2 Subsistema de Radiofrecuencia

Una estación terrena es capaz, al igual que un satélite, de recibir y transmitir, por lo que debe estar adaptada para realizar las dos funciones. Como se vio, la antena tiene la función de recibir y transmitir señales, interactuando con los satélites, sin embargo, en el lado opuesto, tiene un dispositivo conocido como duplexor. Como su nombre lo indica, se encarga de separar, en este caso, el sistema transmisor del receptor. Si una señal viene del espacio y es recibida por la antena, el duplexor mandará la señal hacia el sistema receptor, por el contrario, si una señal se desea transmitir, pasará por el sistema transmisor hacia el duplexor y de ésta hacia la antena para su transmisión.

El subsistema de radiofrecuencia se divide en dos partes:

- La parte del transmisor, compuesta por el equipo amplificador de potencia y el combinador de canalización.
- La parte del receptor, compuesta por el equipo amplificador de bajo ruido y el divisor de canalización.

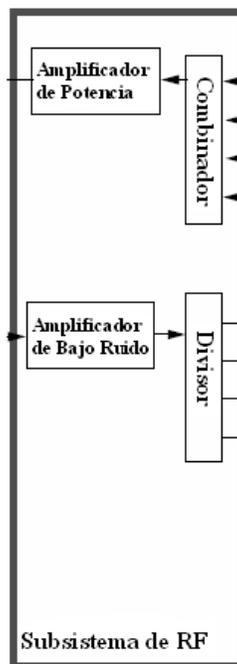


Figura 3-10: Subsistema de Radiofrecuencia.

Para el caso del transmisor, en la etapa de RF, la señal tiene la frecuencia adecuada para ser enviada, sin embargo su nivel de potencia es muy bajo, por lo que es preciso amplificarla antes de

entregarla a la antena; por esto se utiliza un amplificador de potencia, del cual existen fundamentalmente tres tipos: Los de estado sólido (SSPA), el Tubo de Ondas Progresivas (TWT) y el tubo Klystron.

Los amplificadores de estado sólido son los más convenientes y económicos para estaciones que operan con poca anchura de banda total de su o sus portadoras y los más utilizados en las estaciones remotas de las redes de terminales de muy pequeña abertura (VSAT), ya que tienen una gama de potencias hasta de 20 watts, mejor linealidad y menor factor de ruido (aproximadamente 10 dB) que los otros tipos aunque son menos eficientes.

Un TWT es un amplificador de microondas de ancho de banda muy grande, que abarca todas las frecuencias utilizables del satélite, por lo que puede amplificar simultáneamente señales dirigidas hacia distintos transpondedores del mismo con una amplia gama de opciones de potencia hasta 3 kW. El TWT es un tubo al vacío que necesita dos elementos para funcionar: un haz de electrones y la señal que será amplificada. El haz de electrones es producido por un calefactor que inyecta electrones los cuales se desplazan junto con la señal de RF que viaja a través de una hélice, por medio de la interacción de las dos señales, se da una transferencia de energía del haz de electrones a la señal de RF, logrando amplificarla durante el recorrido por hélice que entra de un lado del tubo y sale por el otro.

Los TWT de potencias más bajas emplean enfriamiento por conducción, los de potencias medias ventilación forzada y los de las más altas enfriamiento por agua. Esta característica les da una mayor versatilidad por lo que pueden aplicarse a diversidad de requerimientos. Los TWT de estaciones terrenas emplean fuentes de energía complejas y precisas con altos voltajes y tienen una vida relativamente corta de unos pocos años.

Los Klystron son amplificadores de banda estrecha; consisten en múltiples cavidades resonantes que deben ser sintonizadas a sus frecuencias centrales correspondientes. Su ancho de banda es suficiente para manejar uno o dos canales de televisión analógica, varios cientos de canales telefónicos o algunos canales de datos de muy alta velocidad de transmisión. Tienen una eficiencia alta (40%) de aprovechamiento de energía eléctrica; son muy confiables y robustos, duran mucho tiempo en servicio y, además, son más económicos que un TWT. Para su refrigeración generalmente se utiliza la ventilación forzada de aire hasta potencias de 3 kW.

Tipo	Banda	Potencia de Salida [W]
<b>Estado sólido</b>	C	50 – 350
	Ku	20 – 80
	Ka	10
<b>TWT</b>	C	150 – 12 000
	Ku	18 – 3 000
	Ka	20 – 100
<b>Klystrón</b>	C	400 – 3 400
	Ku	2 700 – 3 000
	Ka	350 – 450

Tabla 1: Valores típicos de la potencia máxima entregada por los amplificadores de potencia.

Dada la posible pérdida de todo un enlace de comunicaciones, si es que el amplificador de potencia falla, por norma general es común encontrar sistemas operativos en los que hay amplificadores de redundancia. La estación terrena puede tener una o varias configuraciones posibles de redun-

---

dancia, por ejemplo, dos a uno (uno operando y otro de reserva) o tres a dos, etc. y en cada caso los amplificadores que operan y el amplificador de reserva son conectados entre la etapa anterior de comunicaciones y la antena con un conmutador de entrada y otro de salida. Generalmente, el nivel de potencia a la salida del convertidor de frecuencias es bajo comparado con el que debe aplicarse a la entrada del amplificador de potencia para que éste funcione adecuadamente. Para solucionar esto, se añade un amplificador excitador (driver) entre el convertidor de frecuencia y el amplificador de potencia, como una etapa de preamplificación a niveles de potencia intermedia.

Para el caso del receptor, no es viable utilizar amplificadores de potencia por una razón en particular. Las señales que son transmitidas por el satélite hacia la base terrena viajan casi 36,000 km, lo que provoca que lleguen con un nivel de potencia muy bajo que puede llegar a ser comparable al ruido del ambiente, por lo que, si se llegara a colocar un amplificador de potencia a continuación de la antena, no solo se amplificaría la señal del satélite, sino que se tendría una amplificación del ruido del ambiente el cual tendría un nivel de potencia comparable al de la señal deseada y complicaría la recepción. Para evitar esto, lo primero que se hace es colocar un amplificador de bajo ruido (LNA) a continuación de la antena.

El amplificador de bajo ruido trabaja con temperatura de ruido muy baja, lo que permite que se añada poco ruido a la señal y así lograr una mayor calidad de recepción. Además de la temperatura de ruido del amplificador de bajo ruido, también se tiene una temperatura de ruido de la antena; la suma de estas dos temperaturas de ruido (antena y LNA) determinan casi completamente la temperatura total  $T$  de ruido del sistema de recepción, para condiciones de cielo despejado, siempre y cuando las pérdidas producidas por los conectores sean bajas.

Considerando la temperatura de ruido  $T$  y la ganancia  $G$  de la antena se puede obtener el valor del cociente  $G/T$ , cantidad que se utiliza comúnmente para definir las cualidades de recepción de una estación terrena. Esta relación  $G/T$  se conoce como factor de calidad, o figura o cifra de mérito, se suele representar como dB/K, debido a las unidades de los parámetros.

El amplificador de bajo ruido debe ser altamente sensible, es decir, que el ruido interno generado por él sea lo más bajo posible. Si la temperatura física se logra reducir, entonces la temperatura de ruido también bajará; por lo tanto, es deseable enfriar al amplificador lo más que se pueda.

Muchos de los amplificadores de bajo ruido actualmente instalados y en operación son paramétricos (circuito de microondas con diodo varactor), amplificadores de efecto de campo (FET) de arseniuro de galio (GaAs) o de transistores más avanzados conocidos como HEMT (High Electron Mobility Transistor).

El gran aumento de la temperatura de ruido de la antena en las bandas Ku y Ka se debe principalmente al comportamiento de la atmósfera en esas frecuencias y a la atenuación de la señal causada por la lluvia; en cambio, las señales que se propagan en la banda C son atenuadas muy poco por la lluvia, y la temperatura efectiva de ruido de la antena es relativamente baja. Debido a lo anterior, cuando un enlace de comunicaciones funciona en las bandas Ka y Ku, es necesario diseñarlo con un buen margen de operación para que cuando llueva, la señal no se degrade a niveles de potencia insatisfactorios; a este margen de diseño se le da precisamente el nombre de margen de lluvia.

La temperatura del amplificador de bajo ruido puede ser controlada por diversos medios: refrigeración criogénica, termoeléctrica o por compensación de temperatura.

La refrigeración criogénica consiste en un sistema de circulación de helio gaseoso, alcanzándose temperaturas cercanas a los  $-250^{\circ}\text{C}$ . Se dejó de usar en la década de los setentas debido a que es costosa y su mantenimiento es complejo.

La refrigeración termoeléctrica permite reducir mucho la temperatura de los componentes sensibles del amplificador; tiene la ventaja de que no requiere ninguna parte móvil, además de que se instala dentro del dispositivo, en una caja sellada herméticamente, lo cual le da mucha robustez y facilidad de mantenimiento. La refrigeración opera con diodos que aprovechan el efecto Peltier. Este efecto consiste en que cuando se aplica una corriente eléctrica en un circuito hecho con la unión de dos conductores distintos, uno se calienta y el otro se enfría, y el efecto es mayor cuando los materiales de la unión son semiconductores.

La refrigeración por compensación de temperatura se utiliza cuando no es necesario que la temperatura de ruido sea muy baja; emplea sistemas de control más sencillos que los de la refrigeración termoeléctrica, es muy confiable y también puede usarse a la temperatura ambiente.

Tipo según electrónica	Enfriamiento	Banda	Temperatura de ruido [K]
<b>Paramétrico</b>	Termoeléctrico	C	30
		Ku	90
	Sin enfriamiento	C	40
		Ku	100
<b>GaAs FET</b>	Termoeléctrico	C	50
		Ku	125
	Sin enfriamiento	C	75
		Ku	125
<b>HEMT</b>	Termoeléctrico	C	23 – 30
		Ku	50 – 70
		Ka	110
	Sin enfriamiento	C	23 – 50
		Ku	65 – 100
		Ka	150 – 300

Tabla 2: Valores típicos de temperatura de ruido para amplificadores de bajo ruido.

La contribución de ruido de un amplificador se suele expresar en función de un factor denominado figura de ruido  $F$ , en lugar de su temperatura de ruido equivalente  $T$ , expresada en grados Kelvin: Los dos parámetros son válidos, sin embargo, para diseño, se utiliza a  $T$  para la banda C y a  $F$  para las bandas Ku y Ka como factores de ruido. La relación entre estos dos parámetros se define como:

$$F = 290[T - 1]$$

En el subsistema de radiofrecuencia se suele utilizar un combinador de canales para el caso la transmisión y un divisor para la recepción. En el caso del combinador, suele colocarse después de los amplificadores de potencia, ya que su función es únicamente juntar todas las señales provenientes de cada canal en una sola que pasará a través del duplexor para ser enviado por la antena. Por otro lado, el divisor se coloca al contrario a continuación del amplificador de bajo ruido, permitiendo separar las señales en canales distintos dirigidos hacia los dispositivos de comunicaciones.

---

### 3.3 Subsistema de Comunicaciones

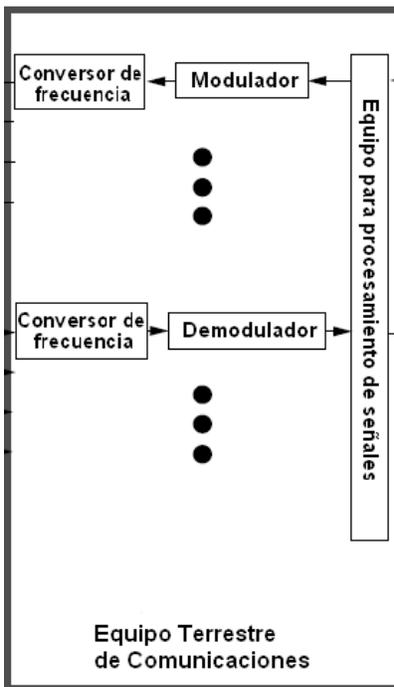


Figura 3-11: Subsistema de Comunicaciones de una estación terrena.

Este subsistema es el encargado de convertir la frecuencia, aumentándola para la transmisión o disminuyéndola para la recepción, modular, demodular y realizar un procesamiento de las señales, analógica y digitalmente. La Figura 3-11, muestra los bloques tanto en la recepción como en la transmisión.

En la transmisión, el subsistema de comunicaciones se encarga de convertir las señales en banda base a señales de radiofrecuencia. Sus funciones son:

- Modulación de portadoras a frecuencia intermedia
- Filtrado y ecualización de señales en frecuencia intermedia
- Conversión de portadoras moduladas a radiofrecuencias

En el caso de tener señales digitales, usando TDMA se agrupan los bits de la señal en banda base y se acomodan en paquetes que son insertados en ranuras de tiempo (time slots) para su transmisión.

El modulador de la estación combina la forma de la señal en banda base con la señal portadora, modificando el ancho de banda de frecuencias y la posición de la información dentro del espectro radioeléctrico, la cual es transferida a frecuencias más altas. Este paso de la señal modulada a frecuencia intermedia (FI) es el primero en su ascenso de conversión a microondas. Aunque el modulador coloca la señal modulada en una región más alta del espectro radioeléctrico, la frecuencia intermedia no es adecuada todavía para radiarla eficientemente a través de la atmósfera.

En la etapa en que la señal está en frecuencia intermedia, se tienen amplificadores, filtros, y ecualizadores que preparan la señal para ser convertida en una señal de microondas.

---

Para poder enviar la señal hacia el satélite, es necesario utilizar un convertidor elevador de frecuencia que transfiere la señal de la frecuencia intermedia a una posición dentro del espectro radioeléctrico en donde las nuevas frecuencias que la integran son mucho más altas que cuando salieron del modulador. La señal tiene ahora las frecuencias apropiadas para poder ser radiada hacia el satélite.

Para la recepción, el subsistema de comunicaciones se encarga de convertir las señales de radiofrecuencia a señales en banda base. Sus funciones son:

- Conversión de portadoras de radiofrecuencia a frecuencias intermedias
- Filtrado y ecualización de señales en frecuencia intermedia
- Demodulación de portadoras en frecuencia intermedia a banda base

Después del amplificador de bajo ruido van conectados en cadena un convertidor reductor de frecuencias y un demodulador, contando los filtros, amplificadores y ecualizadores intermedios. La señal de salida del amplificador contiene toda la información radiada por el satélite en una banda de operación con ancho de 500 MHz, situada aún en la misma región del espectro radioeléctrico; el convertidor reductor tiene como función transferir toda esa información de 500 MHz a una región más baja del espectro, centrándola en una frecuencia intermedia de recepción.

La conversión de reducción de frecuencia se puede hacer en un solo paso, bajando de la frecuencia de llegada de la antena hasta la frecuencia intermedia que se le debe entregar al demodulador. El proceso también puede ser realizado en dos pasos, y se prefiere así cada vez más en las estaciones terrenas, porque es más fácil sintonizar los equipos de recepción de cualquier región del ancho de banda de transmisión del satélite. Esto es importante, porque el plan original del uso de las frecuencias de transmisión del satélite puede variar con el tiempo, en uno o en todos sus transpondedores, o tal vez bajo circunstancias drásticas sea necesario cambiar de satélite, y la frecuencia de trabajo del convertidor reductor puede ser ajustada más fácilmente si se usa doble conversión.

La señal de frecuencia intermedia que sale del convertidor reductor aún está modulada (FM, PSK, etc.) y el paso siguiente para recuperarla en su forma en banda base es precisamente demodularla. En realidad, la señal nunca es recuperada exactamente como era en su forma original, ya que diversos factores (ruido térmico, intermodulación, etc.) se encargan de distorsionarla, además el ruido de cuantización y la interferencia entre símbolos en los sistemas digitales.

Para conocer la calidad de la recepción se utiliza el concepto de relación señal a ruido (S/N), esto es, el cociente de la potencia de la señal deseada dividida entre la potencia del ruido presente.

La relación señal a ruido es la medida de calidad para enlaces analógicos; en una transmisión digital dicha relación no se utiliza, sino que se emplea la probabilidad de error  $P_e$ . La señal digital está compuesta por una secuencia de “unos” y “ceros”; el ruido, al añadir a ellos en diferentes etapas del enlace, ocasiona que algunos unos y ceros sean mal interpretados por el receptor. Cuantos más errores cometa el aparato por efecto de la superposición del ruido, más difícil es reconstruir la señal en su forma original, y en consecuencia, la calidad del servicio se degrada.

Para que un demodulador funcione bien necesita que la señal modulada que entre a él lo haga cuando menos con un nivel de potencia superior al mínimo permisible (umbral), en relación con el ruido que lleva consigo. Para diferenciar los cocientes de la potencia de la señal entre el ruido, tanto en la entrada como en la salida del demodulador, se utiliza la notación C/N a la entrada y

---

S/N ( $P_e$ ) a la salida. Donde C es la potencia de la señal todavía modulada y N es la potencia del ruido distribuido en todo el ancho de banda de la señal modulada. El cociente C/N se denomina relación portadora ruido. Es conveniente utilizar un cierto grado de duplicación o redundancia en los equipos, para que el enlace no se interrumpa aunque algunos de ellos fallen, dependiendo por supuesto del tipo de estación de que se trate.

### 3.4 Subsistema de Interface Terrestre

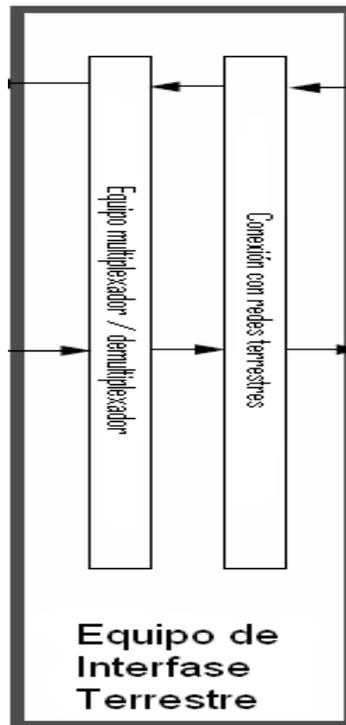


Figura 3-12: Subsistema de Interface Terrestre.

Las señales en banda base que entran a los moduladores de la estación terrena están divididas por canales, estos canales se originan a partir del multiplexador que se encuentra en el bloque del subsistema de interface terrestre. Este dispositivo se encarga de recibir la señal proveniente de la red terrestre y acomodarlo en distintos canales, de acuerdo a la configuración de y uso de la base terrena. Por el contrario, el demultiplexor se encarga de juntar las señales de todos los canales provenientes del receptor para enviarlos por un solo medio hacia las redes terrestres. Por este motivo, los dos dispositivos se muestran en un solo bloque en la Figura 3-12.

Las interfaces con las redes terrestres se requieren cuando las señales en banda base no se originan o no tienen como destino final la propia estación terrena. Ejemplos de estaciones que no requieren dichas interfaces son las de recepción directa de televisión, las móviles y muchas de las remotas de las redes VSAT.

Las interfaces permiten adaptar y sincronizar las señales entrantes desde una red terrenal a las requeridas en la estación terrena y viceversa, en cuanto a voltajes, polarización, señalización, tiempo y otras características. Para la conexión a la red terrenal necesariamente debe encontrarse en la estación terrena un equipo terminal de aquella como parte de un enlace.

---

La terminal de la red terrenal puede en un caso enlazar por fibra óptica grupos primarios de una red telefónica pública con el otro extremo en un centro de conmutación, o en otro ser parte de un enlace por microondas con los estudios de una cadena de televisión. En un telepuerto puede darse servicios a diversos usuarios con tráfico de datos y el enlace con las instalaciones de cada uno de ellos puede hacerse, por ejemplo, por medio de líneas físicas dedicadas de calidad especial, por medio de una red digital que opere a través de fibras ópticas o por medio de una red de radio de acceso múltiple por paquetes, de corto alcance.

### 3.5 Infraestructura General y Sistema de Energía

La infraestructura de una estación terrena incluye en el caso más amplio los edificios con locales para equipos, para oficinas y para habitación, entre otras obras. Los edificios, los equipos e instalaciones que sirven funciones de apoyo para la operación de las estaciones terrenas equivalen a lo que en un satélite constituye su plataforma. Dadas las extremas diferencias entre estaciones terrenas de distintas capacidades y servicios, dicha infraestructura puede ser importante, como en el caso de una estación transmisora receptora de alto tráfico o insignificante y hasta inexistente, como en el caso de terminales móviles pequeñas en transportes o portátiles, o de solo recepción de televisión directa a los usuarios finales. Para hablar de la infraestructura de las distintas configuraciones de bases terrenas, es conveniente hablar un poco de cada una de ellas.

Las estaciones más grandes de gran capacidad de tráfico con múltiples servicios de transmisión de señales de video, voz y datos abiertas al servicio público se conocen como telepuertos y se instalan en ciudades grandes, en otras poblaciones que se encuentran en una etapa de gran desarrollo económico o en sitios cercanos a éstos enlazados por redes terrenales. En los casos en que se enlazan con más de un satélite o con más de una banda del mismo requieren más de una antena, cada una asociada con sus correspondientes cadenas de transmisión y recepción, teniendo en común solo algunos elementos, como pueden ser parte de las interfaces con las redes terrenales y de los sistemas de monitoreo y supervisión.



Figura 3-13: Telepuerto en Banda C y Ku.

---

La infraestructura más compleja se encuentra en los telepuertos de gran capacidad cuando se utilizan varias antenas. Pueden existir antenas pesadas con sistemas de seguimiento y estarán instaladas cada una en un edificio especial, en tanto que antenas fijas de tamaño medio podrán contar con soporte metálico apoyado directamente sobre el suelo en bases de concreto. En un edificio o área central donde se controlan todas las operaciones y se hacen las conexiones de interface y el encaminamiento de las señales estarán alojados también los equipos de telemando y supervisión. Las conexiones de enlace entre las antenas y el edificio central pueden realizarse por medio de guías de onda o cable coaxial, según la distribución de los equipos. Es común que se requiera al menos una torre para soportar antenas de microondas y de radio enlace de señales con el exterior y otros casos hay también terminales de redes de fibra óptica.

El diseño debe realizarse de acuerdo a las necesidades y condiciones requeridas de operación, como puntos importantes se tiene:

- Instalaciones y equipos de climatización
- Adecuación al terreno de las instalaciones y antenas para soportar sismos, mínima distancia entre conexiones, y línea de vista libre para las antenas hacia los satélites.
- Los subsistemas de alarma y protección contra incendios.
- Vías de acceso y estacionamientos
- Sistema de alimentación de energía

Los equipos para el suministro de energía, con capacidades típicas de cientos de kVA, se ubican en una sección separada cercana a las salas principales de transmisión y recepción para que sea poca la longitud de los cables de alimentación. Se debe asegurar la continuidad del suministro de energía para que exista una alta disponibilidad del servicio por satélite. Se deben tomar las precauciones para asegurar dicha continuidad y utilizar energía eléctrica de alta calidad disponiendo de:

- Sistema de suministro de energía ininterrumpible. Este sistema debe tener capacidad cuando menos para las cargas críticas que permiten mantener las comunicaciones por satélite y los enlaces terrenales.
- Generadores de emergencia de arranque rápido y con capacidad cuando menos para las cargas críticas y esenciales, movidos por motores de combustible hidrocarburo para sustituir la energía eléctrica comercial en periodos de interrupción prolongados.
- Banco de baterías tanto para el sistema ininterrumpible como para los dispositivos que vayan a ser alimentados por corriente continua.

Otras instalaciones que requieren consideración especial comprenden la tierra general de la estación, que comúnmente deber ser menor de 5 ohm, y los pararrayos, así como las medidas de contención de fuego en el sistema de energía.

Las redes privadas o públicas de estaciones de abertura muy pequeña conocidas como VSAT tienen una amplia diversidad de aplicaciones y deben diseñarse y optimizarse para cada una. Una característica común de ellas, además del reducido diámetro de los reflectores de antena de sus estaciones remotas, consiste en que tanto para transmisión como para recepción abarcan todas o casi todas las etapas necesarias de conversión y tratamiento de las señales desde banda base en un extremo hasta banda base en el otro. No obstante, se logran algunas ventajas y simplificaciones notables debido al poco número de canales que manejan y a su poca anchura de banda.



**Figura 3-14: Estación remota VSAT.**

Cuando las estaciones remotas transmiten una sola portadora la potencia necesaria puede ser solo una fracción de watt, la demanda total de energía mínima, la señal no sufre efectos de intermodulación en la propia estación, y son innecesarios divisores o combinadores. En estas condiciones, los amplificadores de potencia usados son normalmente los de estado sólido aun para las estaciones maestras con varias portadoras. Estas ventajas, que implican menor costo por estación, alta fiabilidad, mínimo espacio requerido, simplificación del equipo y de su instalación y facilidad de operación se aprovechan frecuentemente en redes de estrella que enlazan una estación maestra de mayor capacidad con remotas de poco tráfico. Usualmente los equipos se dividen en dos partes: una unidad exterior compacta que incluye toda la terminal de radiofrecuencia, generalmente acoplada a la propia antena, y una unidad interior con los elementos para procesar en frecuencia intermedia y banda base. Las VSAT tienen los elementos básicos de una base terrena, con excepción del subsistema de seguimiento, y en muchos casos no cuentan con la interface hacia redes terrenales, sino hacia equipos terminales instalados localmente.

Su sistema de suministro de energía es muy simplificado debido al bajo consumo, pero normalmente cuentan cuando menos con un sistema ininterrumpible compacto de corta autonomía cuando están conectadas a las redes comerciales de energía. Algunos de estos tipos de estaciones fijas, debido a su bajo consumo de energía pueden usarse otros métodos de suministro, como las células solares o generadores termoeléctricos pequeños de alta autonomía que periódicamente son abastecidos de combustible por personal técnico visitante.

### **3.6 Sistema de supervisión y control**

Los sistemas de supervisión y control incluyen funciones de comprobación, alarma y mando remoto, tanto para hacer más eficiente la operación de una red reduciendo la duración y el número de fallas como para reconfigurar los enlaces manual o automáticamente, o determinar otras características de su operación

Las estaciones de mayor tamaño pueden contar con medios para comprobar parámetros de las señales y el ruido tanto en radiofrecuencia como en banda base, los del sistema de energía, los de

---

la antena y su sistema de seguimiento, los estados de actividad de los equipos, algunas de las condiciones de avería en elementos específicos y las variables del medio ambiente exterior a interior. Las comprobaciones tiene la finalidad de detectar degradaciones de las señales o de los subsistemas de apoyo, las posibles relaciones entre el medio ambiente y parámetros de los equipos o tendencias hacia fallas que puedan evitarse antes de que ocurran.



**Figura 3-15: Centro de control satelital de SATMEX.**

La función de control comprende realizar en forma remota la conexión y desconexión de los equipos que no lo hacen en forma automática y determinar sus combinaciones, conmutar los trayectos de transmisión o establecer la conectividad entre las estaciones de la red y establecer las restricciones de cada una de ellas, así como las prioridades en una secuencia automática.

En algunas redes es posible desde una estación central conocer diversos parámetros de operación de todas las demás estaciones terrenas y almacenarlos, así como producir automáticamente listas de sus valores y de las fallas, e informes derivados de su procesamiento, independientemente de los que produzca localmente en la misma forma cada estación sobre su propio desempeño. La información registrada para supervisión de la operación es diferente de la información de tráfico de cada estación que en los sistemas de acceso por demanda se emplea para facturarles el servicio que se les proporciona en función del uso que hagan de la capacidad disponible.

Las estaciones de menor tráfico como las redes VSAT cuentan con alarmas sencillas y como opción medios de comprobación, registro y control, generalmente desde una microcomputadora instalada en una de ellas. Entre las opciones pueden incluir el diagnóstico remoto de fallas en la red y la incorporación de las estadísticas de tráfico a la recolección general de datos de operación. Las redes AMDT de banda angosta utilizan un sistema centralizado de control de su configuración, que puede ser activado manualmente desde su terminal de supervisión o ser programado en el mismo para que se active automáticamente, alternando configuraciones con determinada periodicidad.