



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**INTERFERENCIAS EN SATELITES
GEOESTACIONARIOS**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

PRESENTA:

MIGUEL MAZKIARAN RAMIREZ



DIRECTOR DE TESIS:

M. I. Jesús Reyes García

Ciudad Universitaria, México D.F.

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A MIS PADRES.

POR SU AMOR, SU APOYO, SU ESFUERZO Y TODOS LOS VALORES QUE DÍA A DÍA HAN INCULCADO EN MI. CADA LOGRO ES GRACIAS A USTEDES, ES UN ORGULLO SER SU HIJO.

A MI MAMÁ.

POR TU EXPERIENCIA, DEDICACIÓN, CARIÑO, MI MÁS GRANDE EJEMPLO DEMOSTRANDOME QUE NADA ES IMPOSIBLE Y QUE TODO LO QUE ME PROPONGA VIENE ACOMPAÑADO DE UN GRAN ESFUERZO. TE AMO.

A MI PAPÁ.

MI EJEMPLO A SEGUIR, TAN RESPONSABLE, HONESTO, ADMIRABLE, SERIO Y ENTREGADO A SU FAMILIA. SIN TI NO HUBIERA LLEGADO TAN LEJOS, SE QUE SIEMPRE PUEDO CONTAR CONTIGO. GRACIAS POR TODO.

A MI ABUELITA GRACIELA.

POR TU AMOR INIGUALABLE, TUS CUIDADOS Y POR SER COMO UNA MADRE PARA MI. POR HACER DE MI NIÑEZ ALGO INOLVIDABLE. TE ADORO.

A MIS HERMANOS

OSCAR

POR SER UN GRAN EJEMPLO EN MI VIDA, UN GRAN APOYO, UN CONSEJERO Y UN AMIGO. TE QUIERO.

JORGE.

POR ENSEÑARME A LUCHAR POR LO QUE QUIERO, POR MUY COMPLICADO QUE SEA. AUN ESTANDO LEJOS TU CARIÑO ES MUY IMPORTANTE PARA MI.

LOS QUIERO.

A LA UNAM.

MI SEGUNDO HOGAR. GRACIAS POR DARME LA OPORTUNIDAD DE PREPARARME. POR DARME LAS HERRAMIENTAS PARA SEGUIR CRECIENDO PROFESIONAL Y HUMANAMENTE. MI UNIVERSIDAD CON LA CUAL SIEMPRE ESTARÉ EN DEUDA.

A MI ASESOR.

JESUS REYES GARCIA.

POR SU APOYO, PACIENCIA, COMPRENSIÓN Y DEDICACIÓN PARA LLEVAR CON BIEN ESTE TRABAJO. GRACIAS POR TODO.

A MIS PROFESORES.

POR COMPARTIR CONMIGO UN POCO DE SUS CONOCIMIENTOS Y SU EXPERIENCIA, POR SER GUÍAS EN MI CAMINO.

A MIS AMIGOS.

POR SU AMISTAD, SU APOYO, SU CARÍÑO. CON USTEDES HE COMPARTIDO MOMENTOS BUENOS Y MALOS. HAN SIDO LOS MEJORES COMPAÑEROS EN LA VIDA. LOS QUIERO.

DEDICO ESTE TRABAJO A TODAS AQUELLAS PERSONAS QUE HAN ESTADO CONMIGO, ESPECIALMENTE A PABLO ROBERTO MAZKIARÁN, MI TIO, MI AMIGO, MI COMPAÑERO, QUE SIEMPRE ESTARÁ EN MI CORAZÓN. GRACIAS.

Contenido

Introducción	1
Capítulo 1 Satélites Geoestacionarios	2
1.1 Las órbitas LEO, MEO y GEO	2
1.2 Características de los satélites geoestacionarios	4
1.3 Lanzamiento y puesta en órbita de un satélite geoestacionario	5
1.4 Posiciones orbitales de los satélites geoestacionarios	6
1.5 Ventana de posicionamiento	8
1.6 Vida útil de un satélite geoestacionario	9
Capítulo 2 Estructura de un satélite	10
2.1 Subsistema de antenas	11
2.1.1 Ganancia de una antena	11
2.1.2 Patrón de radiación	12
2.1.3 Polarización	14
2.1.4 Frecuencia de operación	16
2.1.5 Dimensión eléctrica	16
2.1.6 Tipos de antenas	16
2.1.7 Huellas simétricas y asimétricas	19
2.1.8 Otras antenas	22
2.2 Subsistema de comunicaciones	23
2.2.1 Bandas de frecuencia asignadas	24
2.2.2 Reutilización de frecuencias	25
2.2.3 Estructura y funcionamiento de los transpondedores	27
2.3 Subsistema de energía eléctrica	31
2.4 Subsistema de control térmico	33
2.5 Subsistema de posicionamiento y orientación	34
2.6 Subsistema de propulsión	36

2.7 Subsistema de rastreo, telemetría y comando	39
2.8 Subsistema estructural	40
Capítulo 3 Estaciones Terrenas	41
3.1 Subsistema de antena	42
3.1.1 Orientación	44
3.1.2 Montaje	47
3.1.3 Rastreo	48
3.2 Subsistema de Radiofrecuencia	49
3.3 Subsistema de Comunicaciones	53
3.4 Subsistema de Interface Terrestre	55
3.5 Infraestructura General y Sistema de Energía	56
3.6 Sistema de supervisión y control	58
Capítulo 4 Enlaces Satelitales	60
4.1 Potencia radiada	61
4.2 Pérdidas y efectos de la propagación	63
4.2.1 Pérdidas por desapuntamiento	67
4.2.2 Pérdidas en los conectores	68
4.3 Ruido en un enlace satelital	68
4.4 Figura de merito o factor de calidad (G/T)	72
4.5 Contornos de PIRE	73
4.6 Relación total de potencias e interferencias de un enlace satelital	73
4.6.1 Relación de Interferencias	74
Capítulo 5 Fuentes de interferencia en un sistema de comunicación satelital no relacionadas con otros sistemas satelitales	79
5.1 Generación de interferencias en amplificadores de potencia	79
5.1.1 No linealidad de los amplificadores de potencia	79
5.1.2 Productos de intermodulación	80
5.1.3 Productos de intermodulación a la recepción	80

5.2 Interferencias por Polarización Cruzada	81
5.3 Interferencia de Canales Adyacentes	82
5.4 Procesos que pueden generar interferencia durante la transmisión en el enlace ascendente	84
5.4.1 Ruido de fase	84
5.4.2 Conversiones AM/AM	84
5.4.3 Conversiones AM/PM	84
5.4.4 Señal de tipo Barrido	85
5.4.5 Ruido generado en un amplificador Klystron	85
5.5 Interferencias Intencionales	86
5.5.1 Casos de Sabotaje	86
5.6 Fuentes de interferencia que surgen en la operación del sistema o que surgen de otros sistemas de comunicación no satelitales	87
5.6.1 Inducción de señales	87
5.6.2 Por espurias	87
5.6.3 Fallas en la coordinación	87
5.6.4 Interferencia de Radio-Altímetros	88
5.6.5 Interferencia Solar	88
Capítulo 6 Interferencia entre sistemas satelitales adyacentes	89
6.1 Posibles Modos de interferencia	89
6.2 Interferencia entre Satélites Adyacentes	90
6.3 Interferencia generada por una estación terrena en satélites de sistemas adyacentes y de un satélite en estaciones terrenas de sistemas satelitales adyacentes	92
6.4 Interferencia generada por estaciones terrestres en estaciones terrenas	95
6.4.1 Mecanismos de propagación de la interferencia	97
6.4.2 Método de predicción de interferencia en cielo despejado	99
6.4.3 Modelos de predicción para la propagación en cielo despejado	101
6.4.4 Predicción de la interferencia por dispersión debida a los hidrometeoros	102

6.5 Interferencia entre estaciones terrenas	104
6.5.1 Ganancia de antena hacia el horizonte para una estación terrena	104
6.5.2 Ajustes del ángulo de elevación hacia el horizonte y de la distancia de la estación terrena	108
6.5.3 Límite de potencia y de ángulo de elevación para las estaciones terrenas	109
6.5.4 Cálculo de la potencia de interferencia admisible de una emisión interferente	109
Capítulo 7 Prevención y Reducción de Interferencias en Satélites Geoestacionarios	111
7.1 Eficiencia en el uso de la órbita geoestacionaria y el espectro radioeléctrico	111
7.2 Precisión de puntería de las antenas de satélites geoestacionarios	113
7.3 Mantenimiento de la posición en longitud de los satélites geoestacionarios para servicio fijo por satélite	113
7.4 Espaciamiento o separación angular de los satélites geoestacionarios	115
7.5 Técnicas de geolocalización	119
7.5.1 Sistemas de Geolocalización basados en un solo satélite	119
7.5.2 Sistemas de Geolocalización basados en dos satélites	120
7.5.3 Detección	120
7.5.4 Estimación de las componentes de diferencia de tiempo y de frecuencia	124
7.5.5 Combinación de técnicas FDOA y TDOA	125
Conclusiones	128
Apéndice	130
Referencias Bibliográficas	131

Introducción

En la actualidad, la comunicación satelital tiene un desarrollo muy importante, tanto para medios de radiodifusión, como la televisión y la radio, como para redes de datos que transmiten gran cantidad de información y que necesitan de un medio confiable que permita implementar redes complejas sin tener que utilizar robustos sistemas terrestres. Sin embargo, el uso excesivo de sistemas de radiocomunicación ha provocado la sobreexplotación del espectro radioeléctrico y, por lo tanto, los casos de interferencias entre sistemas satelitales han aumentado exponencialmente.

Este trabajo se enfoca en los satélites geoestacionarios, los más utilizados para la comunicación satelital, y en los diversos casos de interferencia, tanto accidentales como intencionales, que los afectan. Por ello, el trabajo está dividido en dos partes: La primera, que comprende los primeros cuatro capítulos, habla de los sistemas de comunicación que utilizan satélites geoestacionarios; y la segunda, que comprende los últimos tres capítulos, explica todos los casos de interferencia que se presentan, las fuentes que la originan y factores que ayudan a reducir las interferencias en estos sistemas de comunicación.

El capítulo uno explica, de manera general, las características más destacadas de los satélites geoestacionarios, su órbita y las razones por las que son tan utilizados para la comunicación.

El capítulo dos habla sobre los distintos subsistemas que componen a los satélites, las bandas de frecuencia asignadas, tipos de antena utilizados, características de los transpondedores, tecnologías, etc. En el caso particular de este trabajo, se profundiza en los satélites geoestacionarios que operan en el servicio fijo.

El capítulo tres se centra en las estaciones terrenas y su estructura general, además de los requerimientos para poder enlazarse con los satélites geoestacionarios, tanto para telepuertos como para terminales pequeñas.

El capítulo cuatro explica cómo se lleva a cabo el enlace entre los satélites y las estaciones terrenas, la potencia, los factores que generan pérdidas en el enlace, el ruido, las interferencias y el cálculo matemático que se realiza previo a la implementación de una red satelital.

En el capítulo cinco se realiza un estudio de las distintas fuentes generadoras de interferencias dentro de un sistema satelital. Errores en la operación o defectos de los equipos que conforman a la red satelital, además de fuentes externas no relacionadas con otros sistemas satelitales, son algunos de los temas tratados.

El capítulo seis profundiza en las interferencias entre sistemas satelitales adyacentes, generadas por la necesidad de implementar redes satelitales cada vez más juntas en una órbita geoestacionaria saturada. Casos como las interferencias entre satélites adyacentes, de estaciones terrenas a satélites, de otra red satelital o, inclusive, de estaciones utilizadas en enlaces terrestres interfiriendo a estaciones terrenas, son explicados con detalle.

Por último, el capítulo siete habla sobre técnicas para prevenir interferencias, ya sea al momento del diseño e implementación de una red satelital, o bien, cuando se desea aumentar el número de redes dentro de un sistema satelital, y de las técnicas de geolocalización más utilizadas en la actualidad.

Capítulo 1 Satélites Geoestacionarios

Los satélites artificiales nacieron a partir de la carrera tecnológica realizada entre Estados Unidos y la extinta Unión Soviética a mediados del siglo XX, siendo los segundos los que lograron lanzar con éxito, el día 4 de octubre de 1957, al primer satélite artificial, el llamado Sputnik I. A partir de este importante avance tecnológico, el desarrollo de satélites ha ido avanzando cada vez más rápido.

Cinco años después, el lanzamiento del satélite Telstar I, el primer satélite de comunicaciones activo, marcaría el inicio de las comunicaciones vía satélite creando el primer enlace televisivo internacional.



Figura 1-1: Telstar I, primer satélite de comunicaciones.

Hay una gran variedad de satélites, ya sea por el tipo de órbita, por su tamaño, por su peso, por la distancia respecto a la Tierra, etc. Sin embargo hay un cierto tipo que, de acuerdo a sus características especiales, es muy utilizado para los servicios de comunicaciones, los llamados satélites geoestacionarios.

Gracias a los satélites geoestacionarios, se puede tener una amplia cobertura de zonas terrestres que son de difícil acceso, por lo que no se podría llegar a ellos utilizando otros medios, por ejemplo fibra óptica. Se utilizan para la radiodifusión, la telefonía móvil, la transmisión de datos a altas velocidades, entre muchas otras aplicaciones que, en la actualidad, son indispensables para la sociedad.

1.1 Las órbitas LEO, MEO y GEO

De acuerdo a la distancia entre un satélite y la Tierra, las órbitas satelitales se dividen en 3 tipos: órbitas bajas (LEO), órbitas medias (MEO) y órbitas geoestacionarias (GEO). Las LEO se ubican a aproximadamente 800 km. Las órbitas MEO se ubican entre 10 000 km y 12 000 km de la Tierra. Y las GEO están ubicadas a 35 786 km de la Tierra.

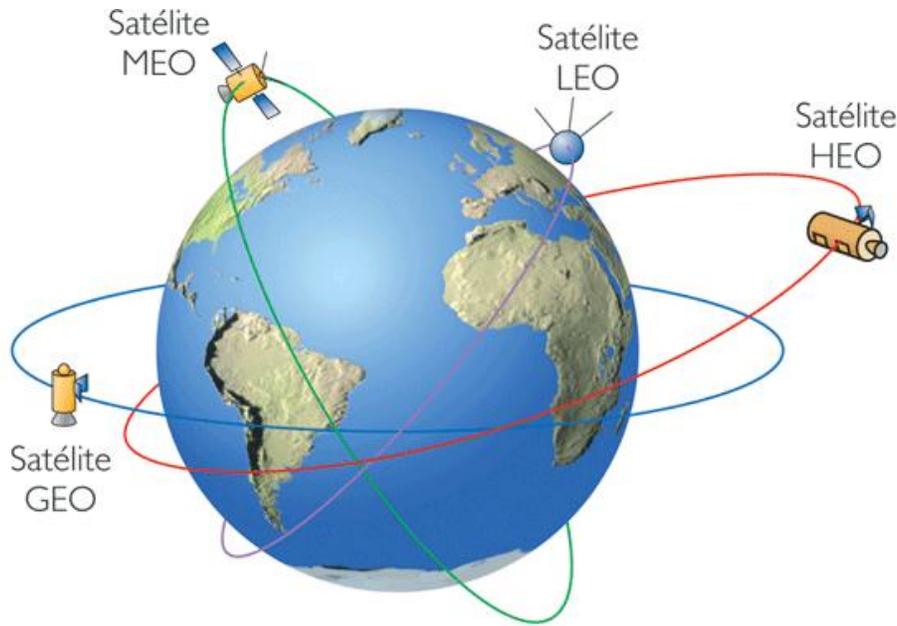


Figura 1-2: Órbitas satelitales

Existen importantes características que se deben analizar para la colocación de un satélite en órbita, ya que es necesario conocer las ventajas y desventajas de cada opción, ya sea para LEO, MEO o GEO. Las órbitas LEO y MEO se ubican a menor distancia de la Tierra comparándolas con la órbita GEO, esto tiene como ventajas una menor atenuación de la señal al realizar un enlace satelital (entiéndase un enlace satelital como la comunicación entre una o varias bases terrenas con un satélite, ya sea al transmitir y/o recibir información a través de ondas radioeléctricas). Una mayor atenuación, como sucede con la señal que se recibe de un satélite geoestacionario, requerirá que se utilicen receptores con mayor sensibilidad que puedan captar la señal transmitida. La otra ventaja es un menor retraso de la señal recibida, esto es fácil de notar debido a que un satélite geoestacionario, al estar más lejos con respecto a la Tierra, provocará que la señal tenga que viajar más distancia a comparación de una señal transmitida por un satélite de órbita media, y más aún con uno de órbita baja.

A pesar de las evidentes desventajas de la órbita GEO con respecto a las órbitas LEO y MEO, existen marcadas ventajas que le han permitido ser una de las opciones preferidas para sistemas de comunicación terrestres.

La más clara ventaja de esta órbita nos la da su nombre y es, por tanto, su principal característica: el término geoestacionario se refiere a tener un satélite que al mirar al cielo, siempre se observa como un punto en el mismo lugar, o sea que no tiene un movimiento aparente. Esta característica permite que sea más fácil, para los sistemas terrestres, ubicar al satélite, ya que siempre estará en la misma dirección, a comparación de los satélites ubicados en órbitas LEO y MEO, los cuales nunca están fijos en el cielo, lo que dificulta su seguimiento por sistemas terrestres, por ello es necesario utilizar constelaciones de satélites en éstas órbitas, ya que de otra forma, es muy probable que se llegue a perder la conexión debido a que los satélites se mueven y al desplazarse de un lado al otro del cielo, terminan por desaparecer de la vista y los sistemas de seguimiento tendrían que esperar a que el satélite diera una vuelta a la Tierra para volver a visualizarlos.

Otra ventaja es la zona de cobertura que pueden manejar los satélites geoestacionarios, ya que, además de ser una zona fija, es amplia con respecto a satélites de órbitas más cercanas a la Tierra, esto es porque las antenas de los satélites, al tener una mayor distancia con respecto a la Tierra, podrán abarcar zonas más grandes de acuerdo a su patrón de radiación, además el tener una zona fija permite ofrecer servicios de manera eficiente.

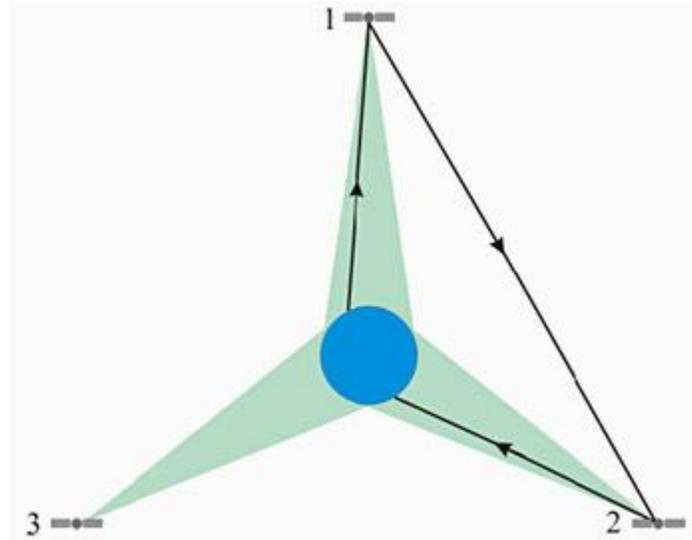


Figura 1-3: Cobertura global utilizando 3 satélites geoestacionarios.

Por estas razones, los satélites geoestacionarios son una elección recurrente para los servicios de Telecomunicaciones, aunque algunos servicios, como la telefonía móvil, suelen utilizar satélites en órbitas bajas debido a las ventajas que se mencionaron anteriormente.

Cabe aclarar que los satélites no solo son utilizados para servicios de Telecomunicaciones, también tienen diversas aplicaciones como en sistemas de detección o como una ayuda en la elaboración de mapas muy precisos de la Tierra, inclusive para cuestiones meteorológicas, en cuyos casos se utilizan satélites en órbitas bajas que mientras se mueven “recorren” distintas zonas de la superficie terrestre capturando imágenes o midiendo patrones.

1.2 Características de los satélites geoestacionarios

Como ya se mencionó, los satélites geoestacionarios se ubican en la órbita geoestacionaria (GEO), la cual tiene características muy especiales con respecto a cualquier otra órbita utilizada para colocar satélites.

La primera característica es que la órbita GEO es geosíncrona. Esto quiere decir que el periodo orbital de cualquier satélite que se encuentra en ella es de 24 horas, o sea que al satélite le toma un día completo en girar alrededor de la Tierra, mismo tiempo que tarda ésta en girar sobre su propio eje, por ello el satélite parece estar fijo en el cielo cuando se le observa desde la superficie terrestre.

Para que la órbita pueda ser geoestacionaria se cumplen 2 cosas: la primera es que la órbita es circular, siendo el perigeo (punto de la órbita más cercano a la Tierra) y el apogeo (punto de la órbita más lejano a la Tierra) iguales, a diferencia de las órbitas elípticas que tiene un apogeo y un perigeo distintos; la segunda es que el llamado plano orbital, aquel en el que se encuentra la órbi-

ta, corresponde al plano ecuatorial, el cual divide la Tierra a la mitad, esta característica es la que diferencia a una órbita geosíncrona de una geostacionaria, ya que la órbita geosíncrona puede no estar en el plano ecuatorial, por lo que tendría una inclinación con respecto a éste, en cambio se considera que la geostacionaria tiene una inclinación igual a cero con respecto al plano ecuatorial.

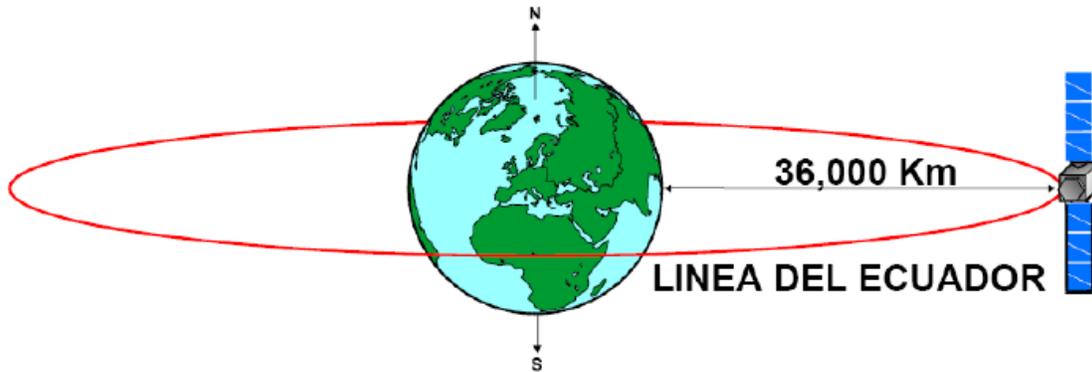


Figura 1-4: Órbita geostacionaria, ubicación respecto a la Tierra.

La altura de la órbita GEO, mencionada con anterioridad, es de 35 786 km, en la cual los satélites deben girar en el mismo sentido que la Tierra a una velocidad orbital de 3.075 km/s, esta velocidad es tangencial a la órbita y permite que el satélite se mantenga en la órbita, de otra forma, con una velocidad menor, el satélite sería atraído a la Tierra, y por el contrario, teniendo una velocidad mayor, el satélite podría salir de la órbita hacia otras más lejanas y podría perderse. Claro está que hay muchos factores que afectan la posición del satélite en la órbita, por lo que este dato es solo teórico y solo sirve como una guía en la práctica.

1.3 Lanzamiento y puesta en órbita de un satélite geostacionario

Al tener construido un satélite, el siguiente paso es llevarlo al centro espacial desde donde será lanzado, pero para ello es necesario saber los costos que conlleva su lanzamiento, los cuales dependen de distintos factores entre los cuales se incluye el ángulo de inclinación que debe tener el plano orbital, que para el caso de un satélite geostacionario es igual a cero, la selección y costo del lanzador, y lo más importante, la selección del centro espacial utilizado para el lanzamiento.

Para la selección del centro espacial es necesario conocer sus coordenadas geográficas. La razón es muy simple, tomando en cuenta el lanzamiento de un satélite geostacionario, se debe colocar en la órbita GEO la cual es coplanar al Ecuador, lo que significa que entre más cercano al Ecuador se encuentre el centro espacial, la potencia para llevar al satélite hacia ese plano orbital será menor, por el contrario, entre más lejos se encuentre del Ecuador, se requerirá de mayor potencia ya que la inclinación con respecto al plano será mayor, por lo tanto se tendrá mayor gasto de combustible, lo que conlleva a un costo mayor en el lanzamiento.

Para el caso de los satélites geostacionarios, que son de gran tamaño y potencia, se necesitan los cohetes más poderosos, también debido a la altura de sus órbitas y a la velocidad a la que se necesitan acelerar los satélites para colocarlos en la llamada órbita de transferencia.

La colocación de un satélite geostacionario en órbita no es un proceso instantáneo, es todo un procedimiento muy cuidadoso y preciso que conlleva el uso de la llamada órbita de transferencia

de Hohmann, nombre dado en honor al científico alemán Walter Hohmann, el cual dedujo una técnica para la colocación de satélites en órbita, dicho proceso se explica a continuación.

Los satélites son lanzados desde la Tierra transportados en un cohete que se coloca en una órbita circular baja. En un punto de la órbita, que se considera como el perigeo, el cohete, en su última etapa, enciende el llamado motor de perigeo, el cual acelera al satélite para dejarlo en una órbita elíptica muy alargada conocida como órbita de transferencia, la cual tiene a su perigeo como punto común de la órbita circular baja en la que se encontraba el satélite, y a su apogeo como punto común de la órbita geoestacionaria. Una vez colocado el satélite en ésta órbita, debe llegar al apogeo, en donde, con el prendido del motor de apogeo, acelerará hasta llegar a una velocidad de 3.075 km/s, para poder colocarse en la órbita geoestacionaria.

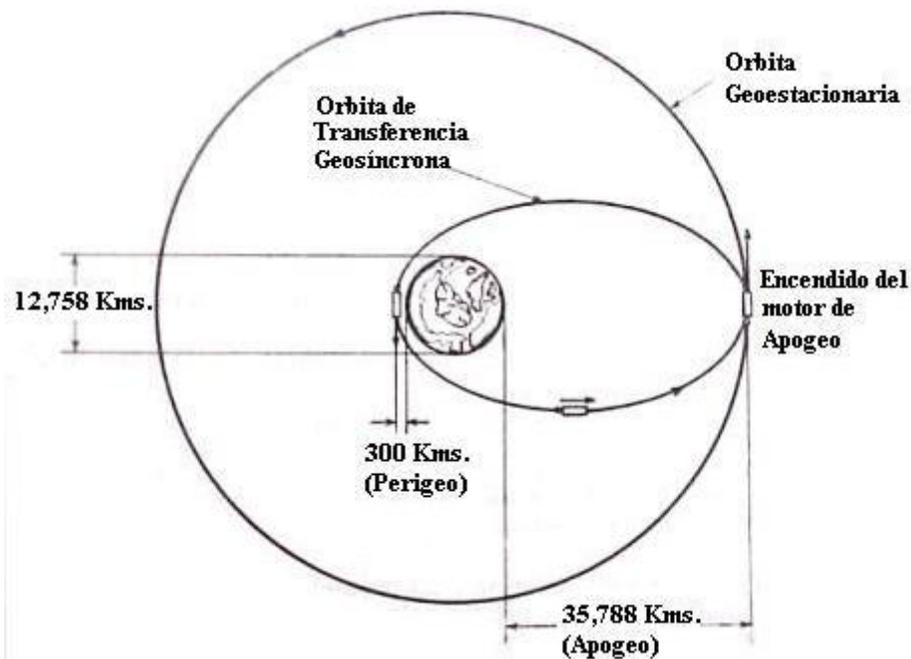


Figura 1-5: Proceso de colocación de un satélite en la órbita geoestacionaria.

En general es un proceso fácil de explicar, sin embargo, el ponerlo en práctica es complicado, ya que se deben de tomar en cuenta muchos factores, por lo que se realiza un estudio previo de la relación entre el tipo de combustible, la eficiencia del motor y el incremento de la velocidad. También es importante tener en cuenta la dirección de la velocidad, ya que, en la realidad, no se realizan lanzamientos exactamente en el Ecuador, por lo que existe una inclinación que se corrige calculando la dirección de la potencia originada con la activación del motor de perigeo del cohete. Con todo esto, el tiempo en que un satélite tarda en colocarse en su órbita y comienza a funcionar se lleva algunas semanas, esto sumado al tiempo de monitoreo que se tiene en el que se checa si el satélite es completamente funcional porque, muchas veces, el viaje en el cohete puede llegar a dañar al satélite, lo que claro está dentro de la póliza de seguro que representa un gasto adicional a los costos técnicos de lanzamiento.

1.4 Posiciones orbitales de los satélites geoestacionarios

La órbita geoestacionaria es única en su tipo, ya que por sus características especiales, permite un gran desarrollo de las comunicaciones a grandes distancias, sin embargo, al ser sólo una órbita, se

considera como un recurso muy demandado y que, a pesar de su perímetro de aproximadamente 265 000 km, longitud en la que se podrían colocar un gran número de satélites, tiene una capacidad limitada.

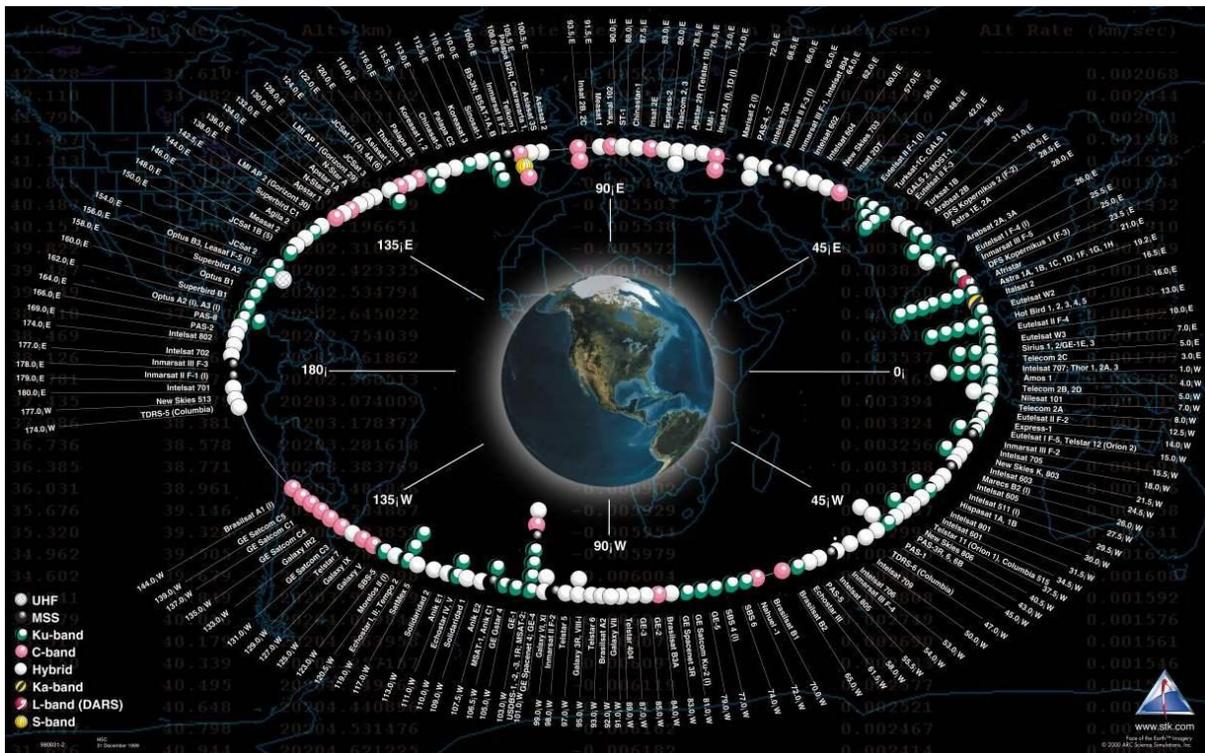


Figura 1-6: Posiciones orbitales.

La limitante es que los satélites usan antenas, las cuales tienen un cierto patrón de radiación. Si dos satélites están a corta distancia uno de otro, podrían llegar a interferirse debido a la radiación generada por sus antenas, por lo que es necesario colocarlos lo más lejos posible para impedir interferencias, pero hay que tomar en cuenta que la órbita estará poblada por muchos más satélites, por lo que se divide la órbita geoestacionaria en posiciones orbitales.

La separación en grados entre satélites vecinos está regida por los niveles permisibles de interferencia radioeléctrica, con el fin de garantizar la buena calidad de la transmisión y recepción de cada uno, especialmente si funcionan en bandas de frecuencias similares. Se debe de tomar en cuenta que los patrones de radiación de las antenas de los satélites (generalmente platos parabólicos), deben cumplir con normas internacionales y los propietarios de los satélites vecinos deben vigilar y coordinar las posibles situaciones de interferencias mutuas, con el fin de evitarlas o reducirlas al mínimo, en particular cuando, por congestiónamiento del arco, sus unidades estén físicamente más cerca de la media. Se considera como congestiónamiento de arco a las zonas en que existe una alta densidad de satélites en una parte del arco de la órbita, por ejemplo en longitudes útiles como América o Europa.

Las posiciones orbitales se determinan a partir de la posición de 0° sobre el meridiano de Greenwich, de allí se comienzan a determinar las demás hacia el Este o hacia el Oeste, por ejemplo el satélite Sátmex 5 está colocado en la posición 116.8° O.

1.5 Ventana de posicionamiento

Una vez que un satélite es puesto en órbita, tomando en cuenta que todo el proceso se realizó con éxito, y se encuentra activo y funcionando con normalidad, la siguiente tarea es monitorearlo.

De acuerdo a lo que ya se explicó, el satélite no debe causar problemas de interferencia ni degradaciones de la calidad de las señales recibidas o transmitidas por él, y por lo tanto debe permanecer ahí lo más fijo que se pueda. A pesar de la gran velocidad que lleva con la cual gira alrededor de la Tierra, el satélite debe permanecer en la órbita geoestacionaria y además nunca perder la orientación de las antenas las cuales tienen que apuntar hacia la Tierra o hacia el lugar en el que le permite dar el servicio para el que está diseñado. Sin embargo, existen muchas fuerzas que se encargan de no permitirle al satélite cumplir del todo con sus objetivos. Estas fuerzas empujan y tiran de él de un lado a otro y no permiten que se quede en un mismo punto. Por ello, los satélites cuentan con un subsistema de propulsión, controlado por órdenes a control remoto desde un centro de control ubicado en tierra, que les ayuda a corregir su orientación y posición.

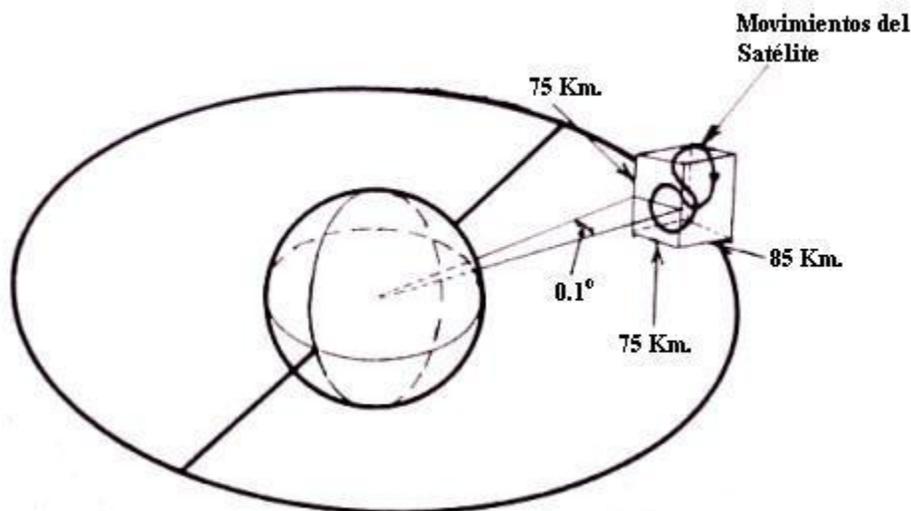


Figura 1-7: Ventana de posicionamiento de un satélite geoestacionario.

Debido al constante desplazamiento del satélite hacia varias direcciones, el subsistema de propulsión se encarga de mantener al satélite dentro de una zona de tolerancia. Ésta zona es una especie de caja imaginaria dentro de la cual el satélite puede estar moviéndose sin problema, pero no puede salir de ella, a ésta caja se le conoce como ventana de posicionamiento.

Para mantener al satélite dentro de la ventana de posicionamiento, hay que tener un seguimiento constante para observar su posición y encender el subsistema de propulsión por control remoto antes de que salga, para así hacerlo volver hacia el otro lado de la caja. Para realizar estas maniobras se necesita precisamente un centro de control espacial informatizado en tierra, y que el satélite le envíe cierto tipo de información que le permita a los operadores y a los ordenadores hacer sus cálculos para decidir acertadamente en qué momento realizar las maniobras.

De las distintas fuerzas perturbadoras que afectan la posición y orientación del satélite, existen 3 que se consideran las más significativas y que demandan un mayor incremento de velocidad generado gracias al subsistema de propulsión: La triaxialidad del campo gravitacional terrestre, que no es más que la fuerza del campo gravitacional de la Tierra que afecta al satélites; La atracción gravi-

tacional del Sol y la Luna, que son de baja magnitud pero que de todas formas afectan; y la presión de la radiación solar. Estas fuerzas tienen como consecuencias desviaciones norte-sur (inclinación de la órbita) y este-oeste (progresión en longitud), considerando que las correcciones norte-sur generan un mayor gasto de combustible que las correcciones este-oeste.

1.6 Vida útil de un satélite geoestacionario

Las perturbaciones que afectan la posición del satélite provocan que se tenga que utilizar un subsistema de propulsión para corregir dicha posición, pero para activar el propulsor se necesita combustible, sin embargo, el combustible dentro de un satélite no puede durar para siempre, por lo que representa una limitación en el tiempo de vida útil. Así es que, la cantidad de combustible determina el tiempo que un satélite puede durar trabajando, ya que acabándose el combustible no hay otra forma de poder corregir la posición, por lo que se pierde el control sobre él.

Después de varios años de trabajo normal y de correcciones para mantener el satélite dentro de su ventana de posicionamiento, el combustible se agota; entonces es preciso desactivarlo, para evitar posibles interferencias radioeléctricas con otros sistemas satelitales cercanos. Sin embargo, el artefacto que va a ser desactivado no permanece en su antiguo hogar o ventana de posicionamiento, ya que lo más seguro es que se esté preparando otro satélite que supla al que ha llegado al fin de su vida útil en la misma posición orbital para mantener la continuidad del servicio de telecomunicaciones e incluso mejorarlo con tecnologías más avanzadas. Por lo tanto, la última reserva de combustible es utilizada para impulsarlo hacia una órbita superior a la órbita geoestacionaria. Se escoge una órbita superior porque, el ponerlo en una órbita inferior representaría un peligro, considerándolo como desecho o chatarra espacial que podría afectar en la colocación de satélites nuevos.

Los satélites impulsados al final de su vida útil hacia la nueva órbita de retiro o “cementerio de los satélites”, como se le conoce comúnmente, pueden quedar a una altitud adicional que va desde unos 100 km hasta varios cientos de kilómetros.

Después de que un satélite es desorbitado y apagado permanece en órbita alrededor de la Tierra, describiendo en su trayectoria una figura o traza semejante a la de un número ocho todos los días. Esta traza crece con el tiempo, conforme aumenta la inclinación progresiva del plano orbital hasta llegar a una posición de equilibrio en el que el satélite permanecerá errante a aproximadamente 100 km de la órbita geoestacionaria.

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.

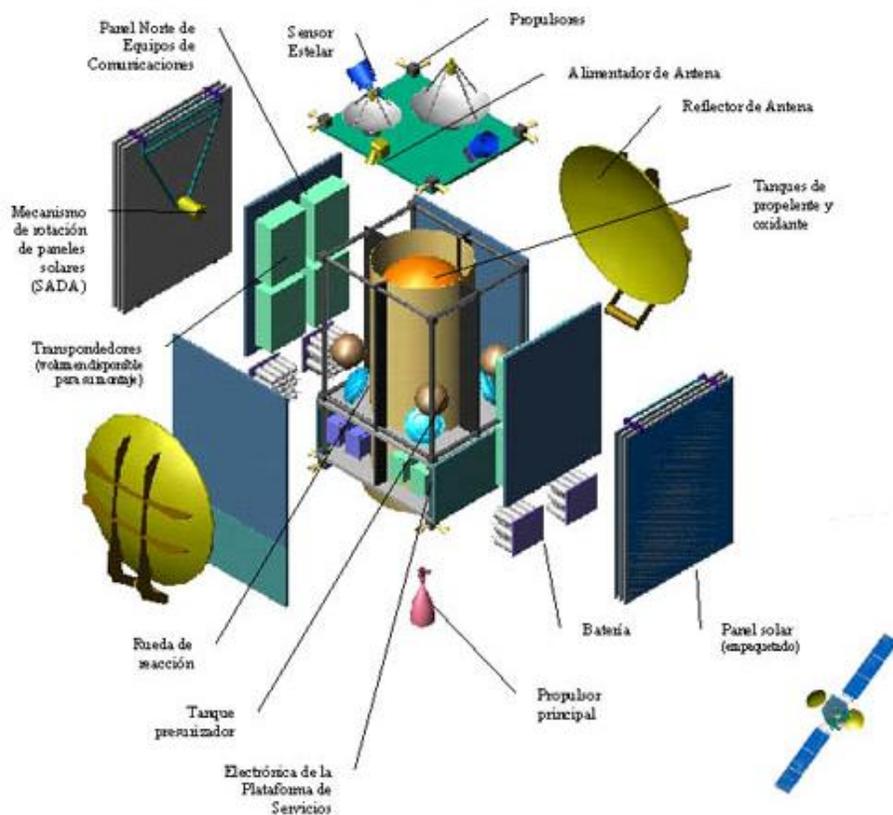


Figura 2-1: Partes que componen a un satélite con estabilización triaxial.

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.

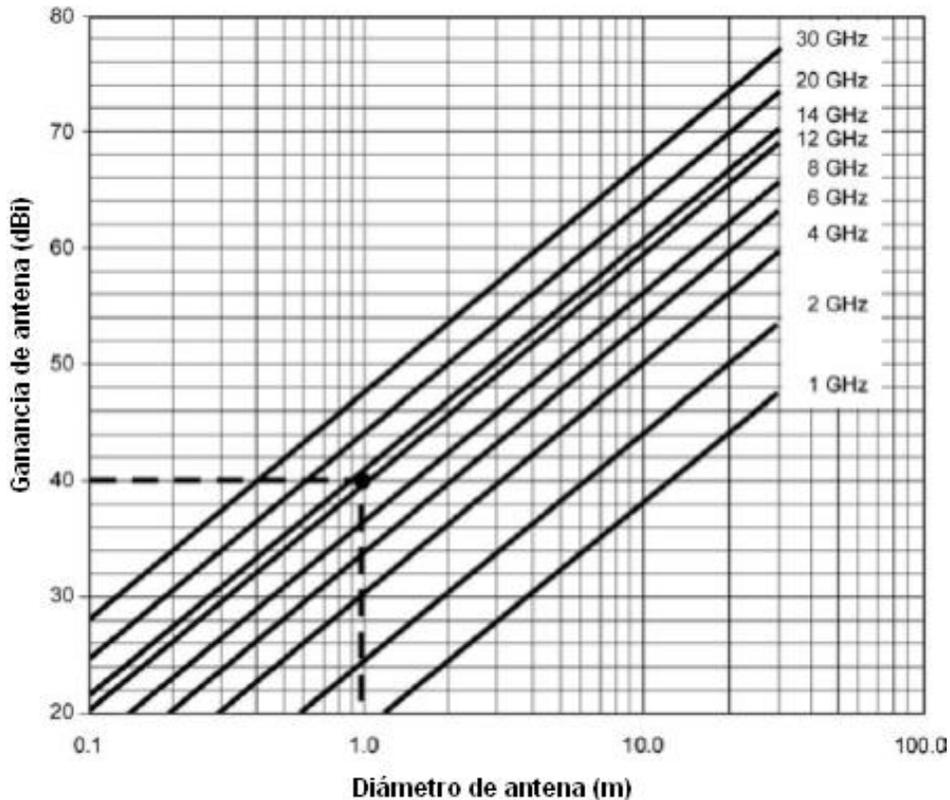


Figura 2-2: Ganancia vs diámetro de una antena parabólica.

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).

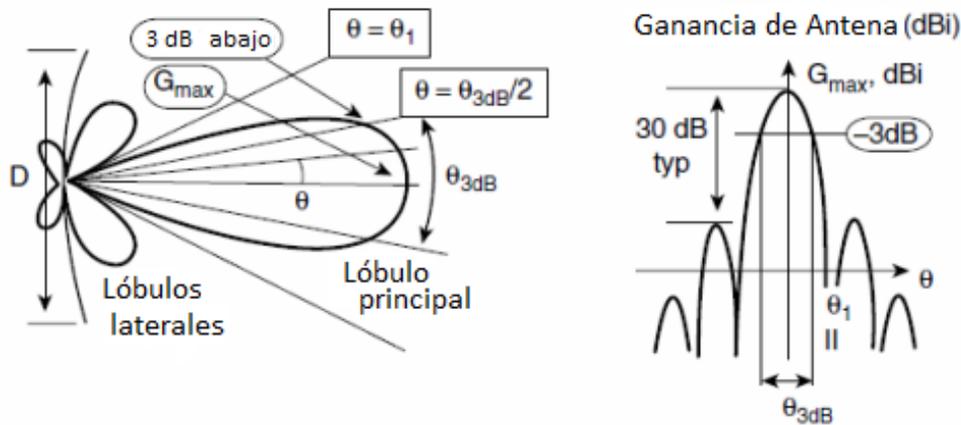


Figura 2-3: Ejemplo de la representación gráfica de un patrón de radiación.

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.

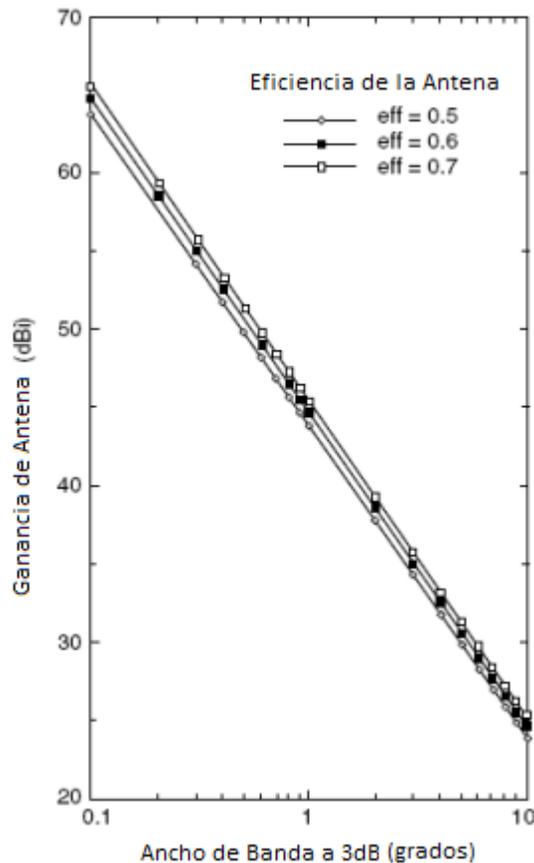


Figura 2-4: Ganancia de la antena en la dirección de máxima radiación con respecto al ancho de haz.

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.

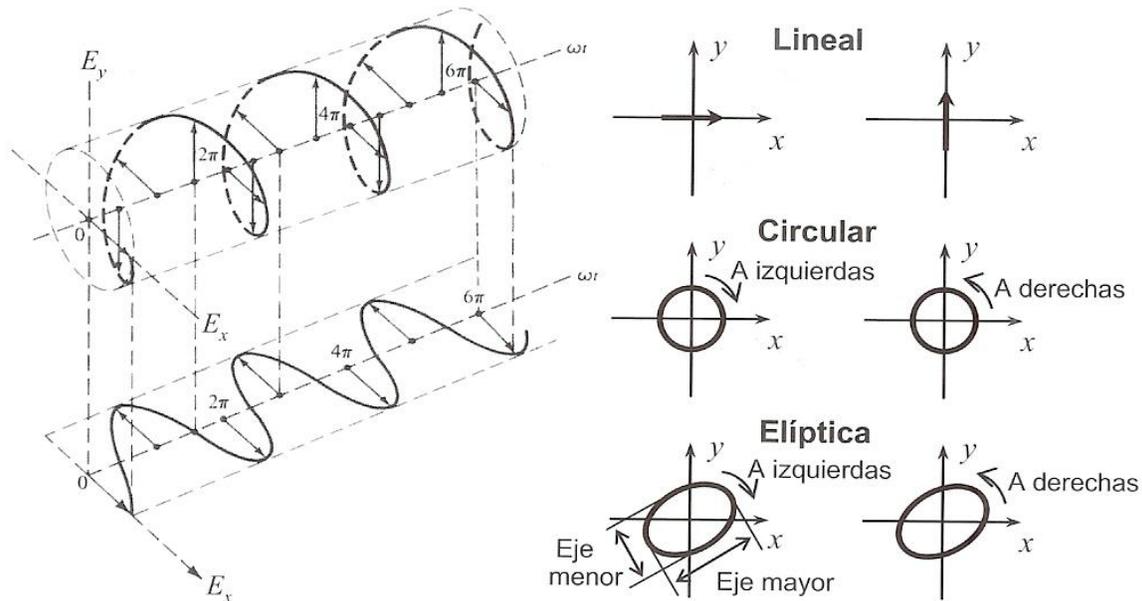


Figura 2-5: Tipos de polarización.

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.

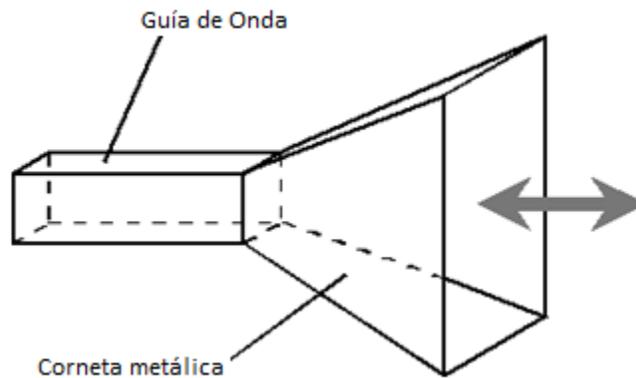


Figura 2-6: Antena de corneta.

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.

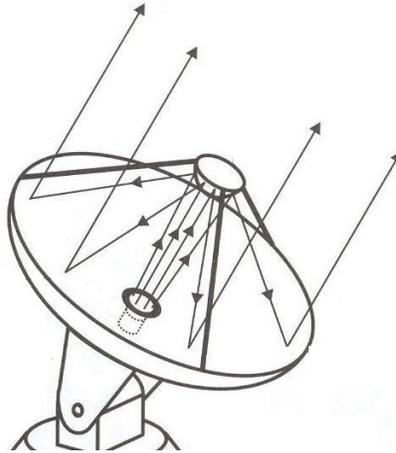


Figura 2-8: Antena con reflector Cassegrain.

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.

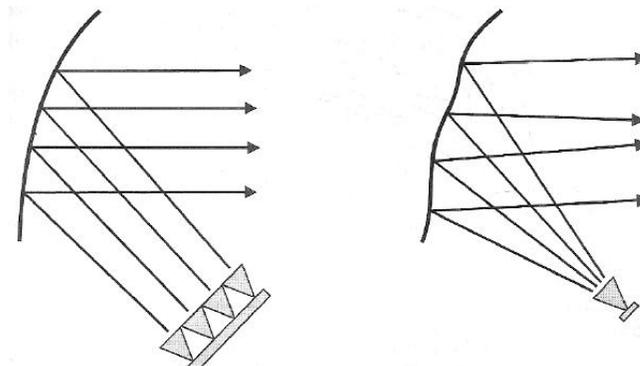


Figura 2-10: A la derecha una antena con reflector de superficie irregular. A la izquierda una antena parabólica con un arreglo de alimentadores.

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.

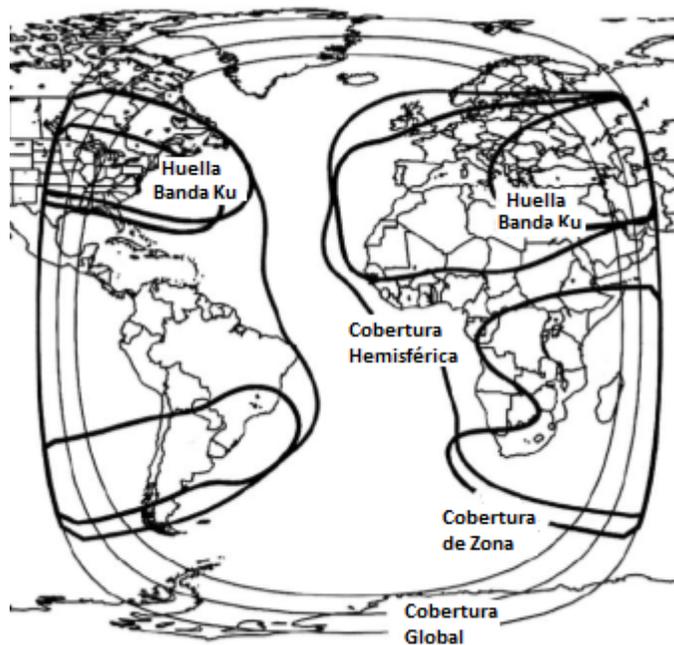


Figura 2-11: Ejemplo de los distintos tipos de huellas.

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.

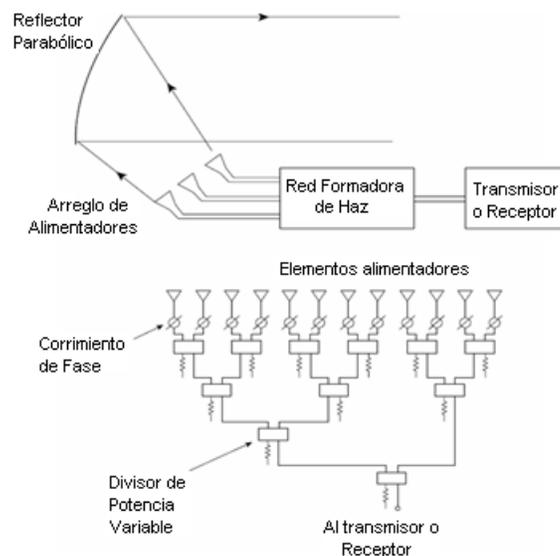


Figura 2-12: Configuraciones de arreglo de alimentadores para generar huellas irregulares.

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.

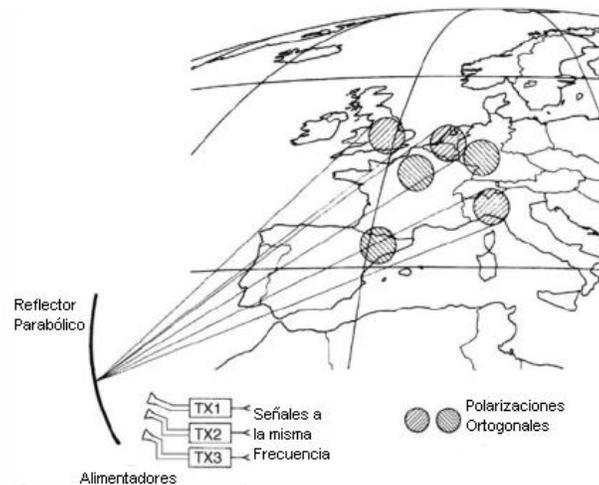


Figura 2-13: Generación de múltiples huellas con polarización ortogonal. Reutilización de frecuencias.

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.

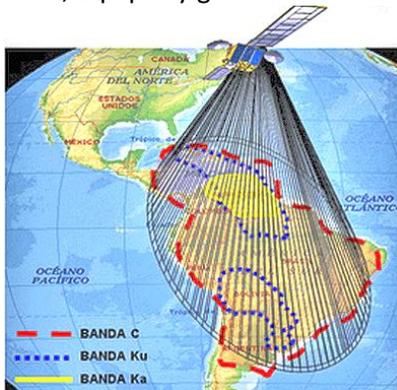


Figura 2-14: Huella irregular de un satélite.

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.

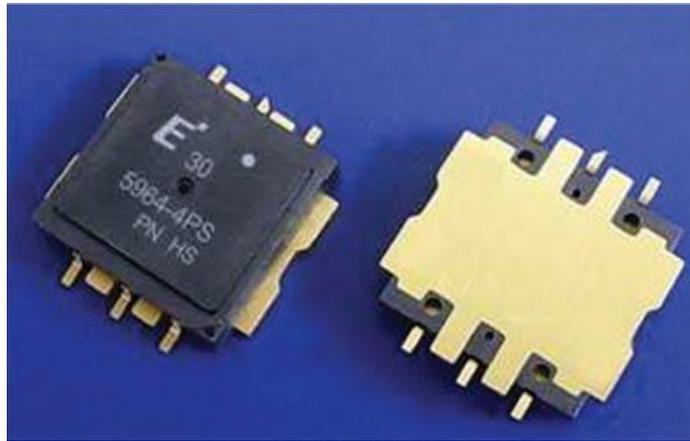


Figura 2-15: Amplificadores hechos con tecnología MMIC.

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.

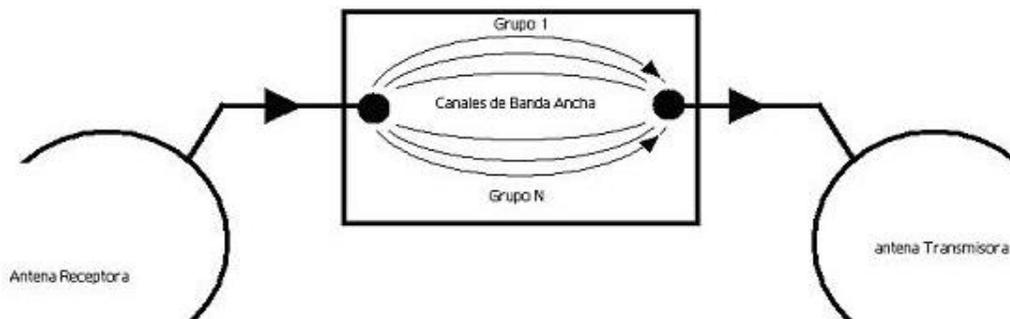


Figura 2-16: Representación de un canal de banda ancha.

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.

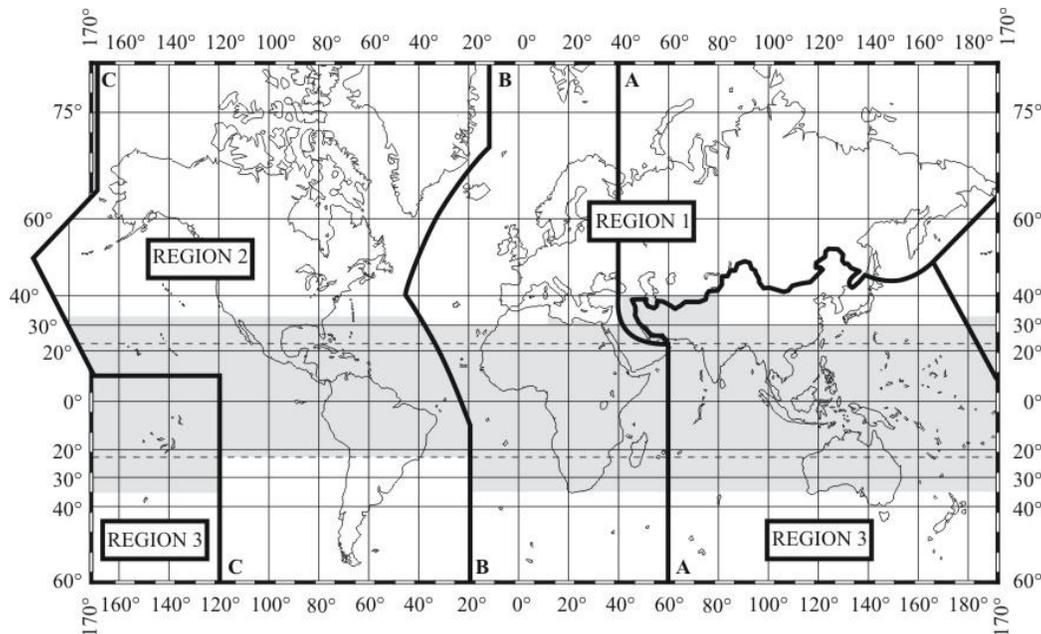


Figura 2-17: División del mundo en 3 regiones por la UIT.

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.

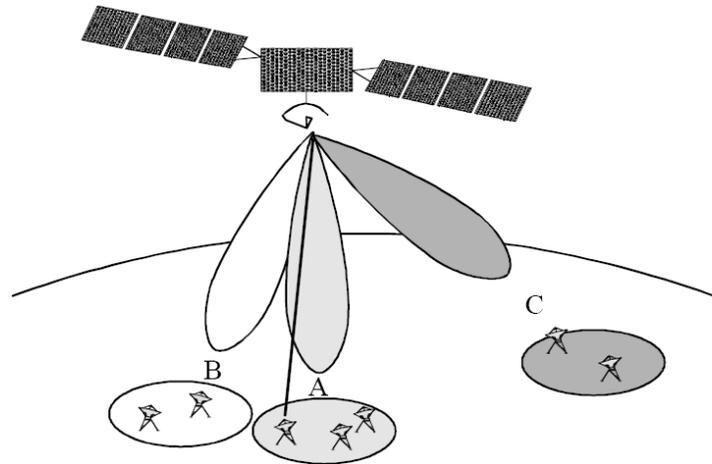


Figura 2-18: Reúso de frecuencias utilizando aislamiento espacial.

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.

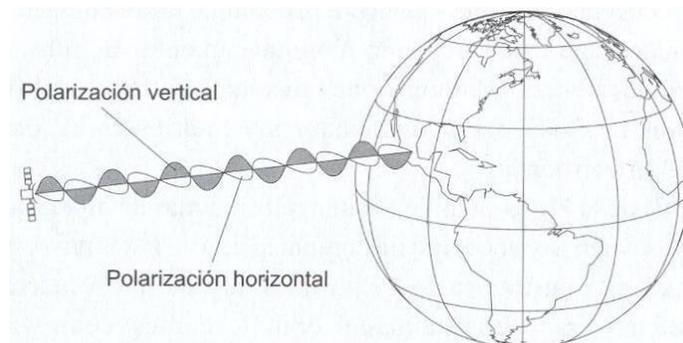


Figura 2-19: Reúso de frecuencias utilizando discriminación de polarización.

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.

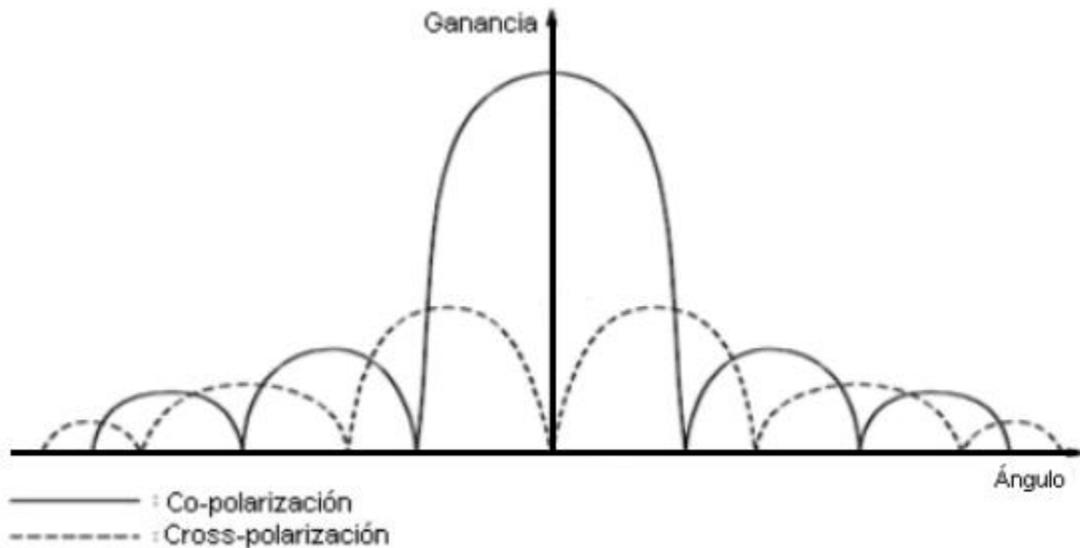


Figura 2-20: Diagrama de radiación para una antena con polarización ortogonal.

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.

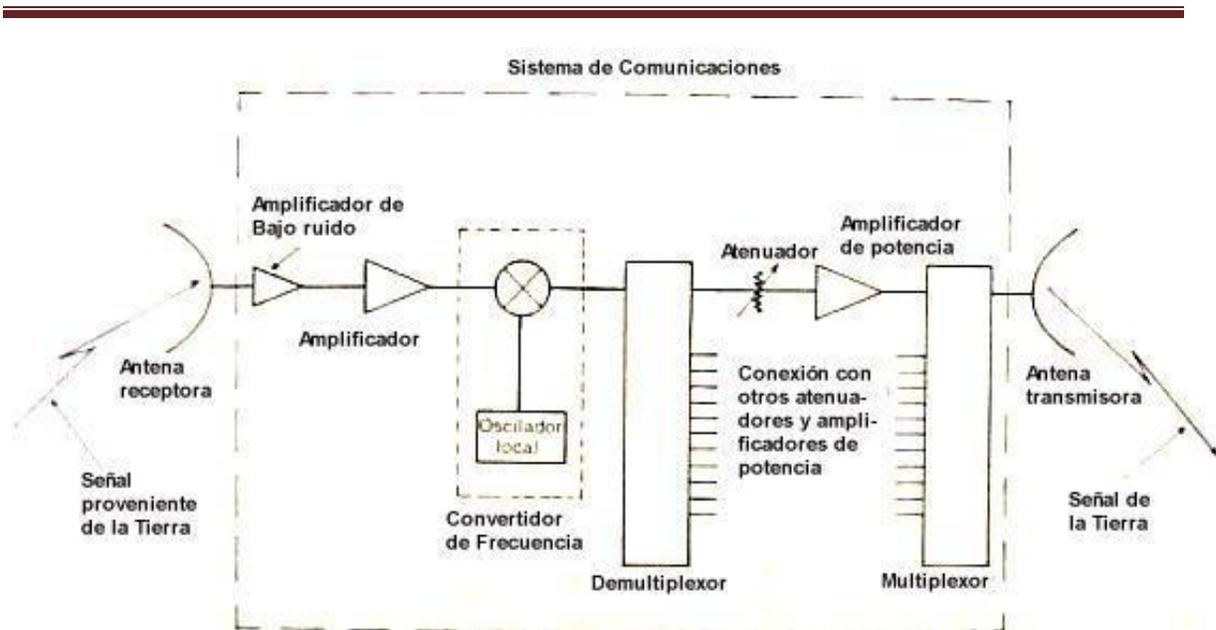


Figura 2-21: Estructura general de un transpondedor satelital.

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.

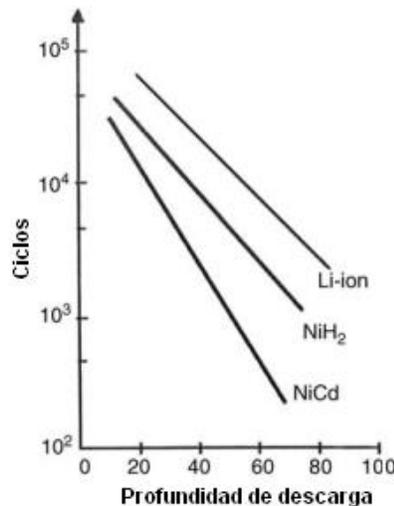


Figura 2-23: Ciclos vs profundidad de descarga.

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 kraptón, 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.

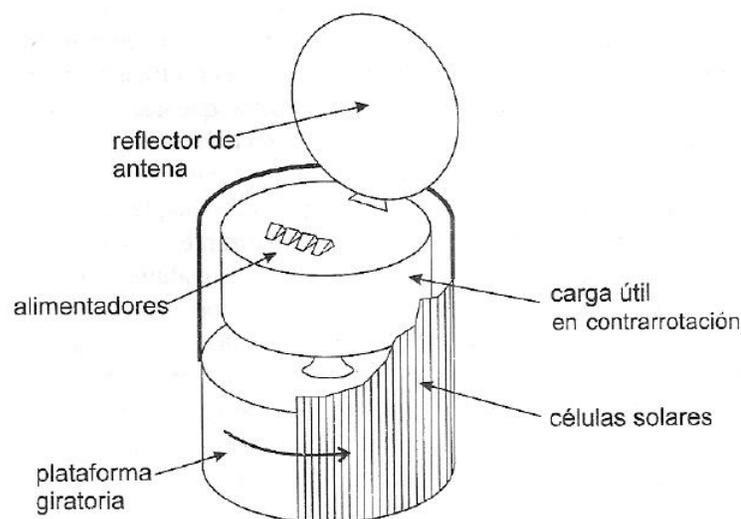


Figura 2-25: Satélite con estabilización por giro.

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.

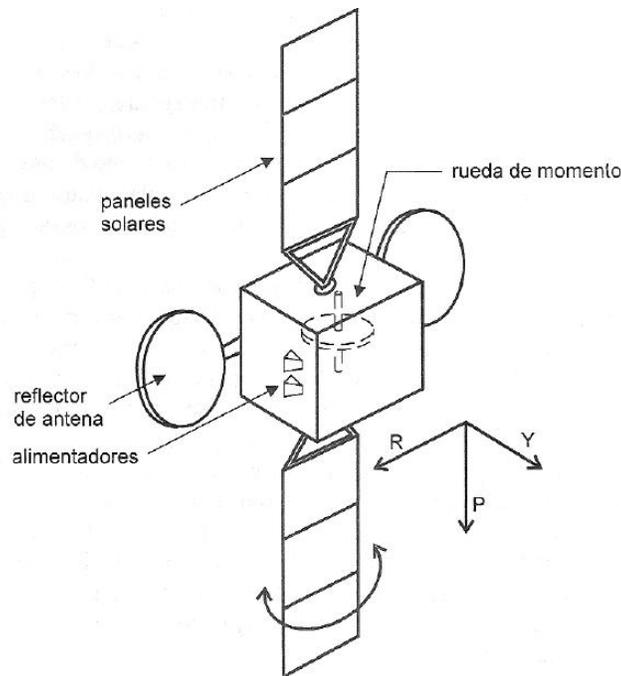


Figura 2-26: Satélite con estabilización triaxial.

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 propulsores 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 armazón que sostiene a todos los equipos que lo forman y que le da la rigidez necesaria para soportar las fuerzas y aceleraciones a las que se ve sujeto desde el momento en que abandona la superficie de la Tierra. 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.

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.

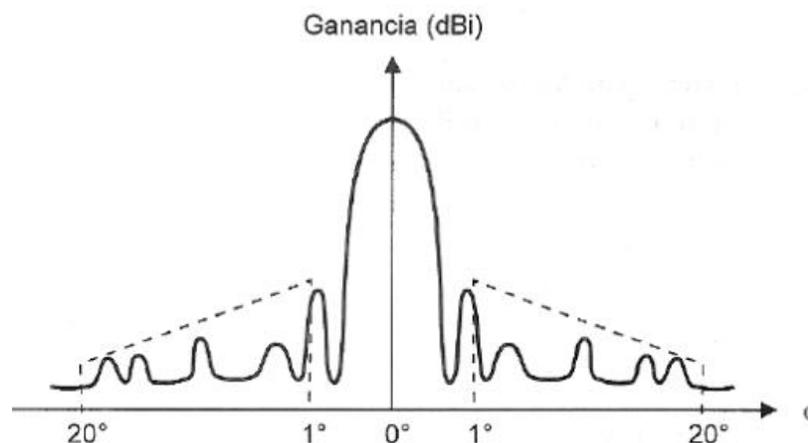


Figura 3-2: Patrón de radiación que muestra las limitaciones de lóbulos laterales de una antena de estación terrena.

- 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.

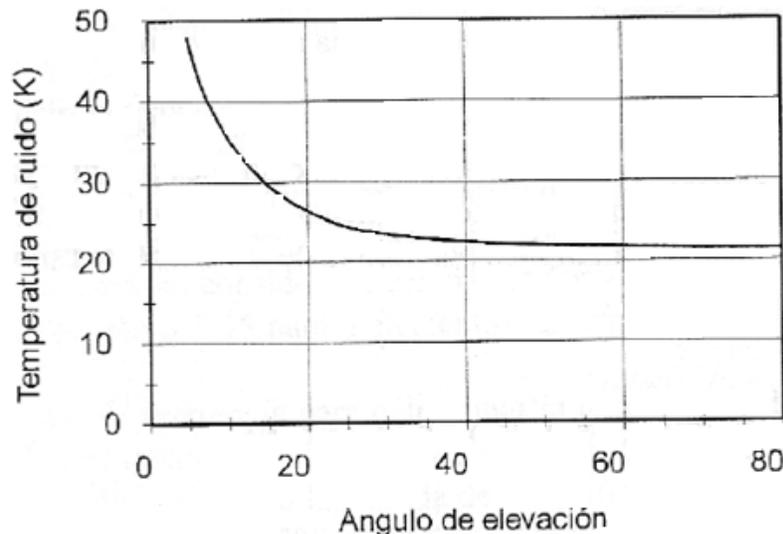


Figura 3-3: Temperatura de ruido vs Ángulo de elevación.

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° o menor es extraordinariamente alta e impide toda comunicación; Su efecto cuando el haz es mayor a 0.5° 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.

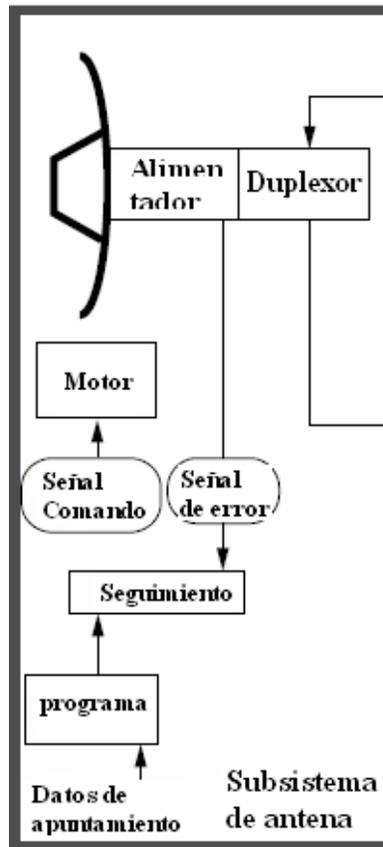


Figura 3-4: Subsistema de antena.

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 θ 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).

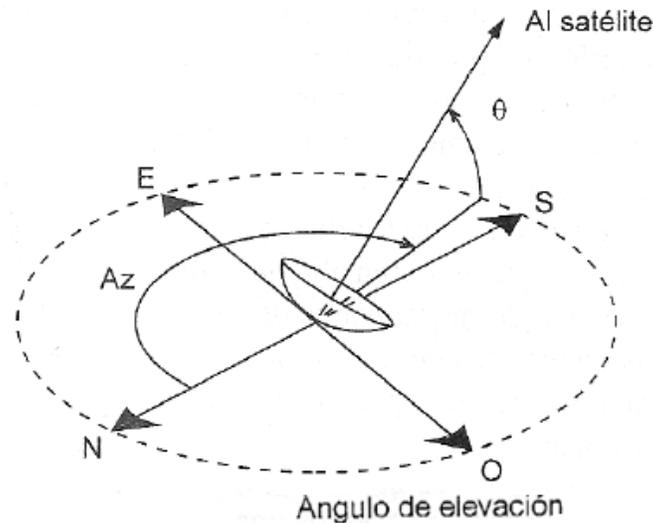


Figura 3-5: Ángulos de Acimut y elevación de la antena de una estación terrena.

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.

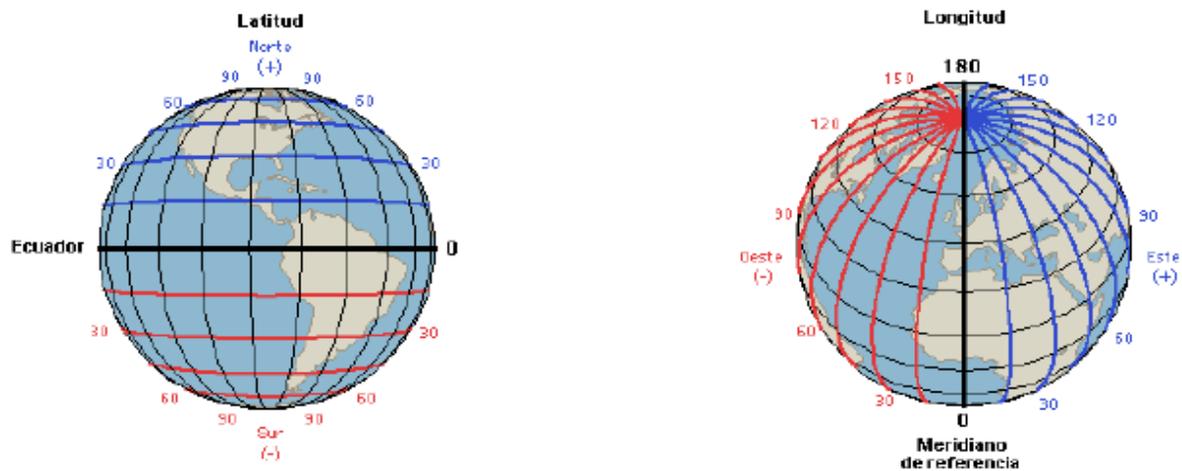


Figura 3-6: Longitud y latitud.

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° a 360° .

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

El ángulo de acimut φ 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.

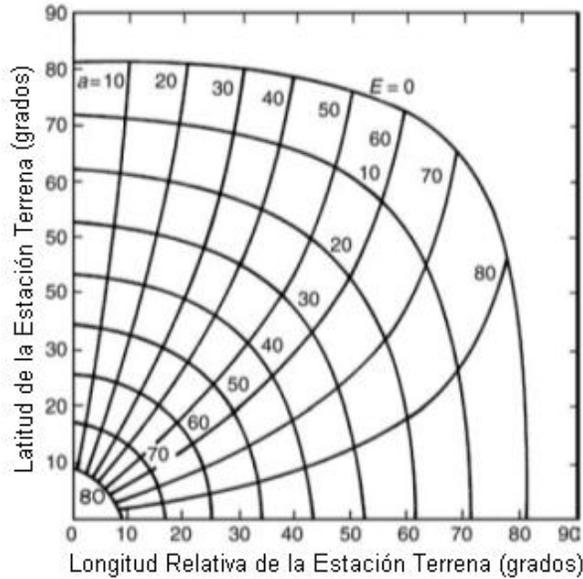


Figura 3-7: Relación entre la longitud relativa y latitud de una estación terrena.

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

ΔL = | 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.

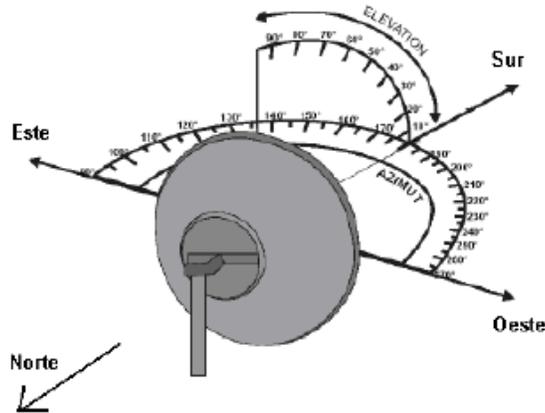


Figura 3-8: Acimut y elevación de una antena de base terrestre.

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.

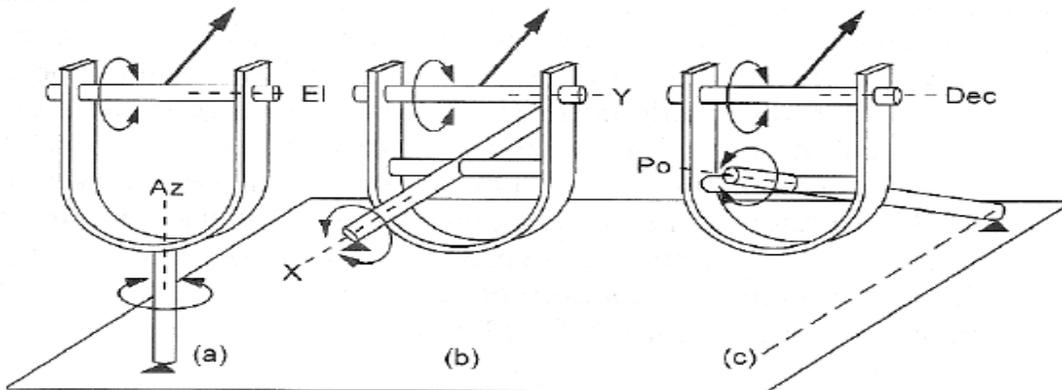


Figura 3-9: Tipos de montaje.

- 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.
- 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° 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.

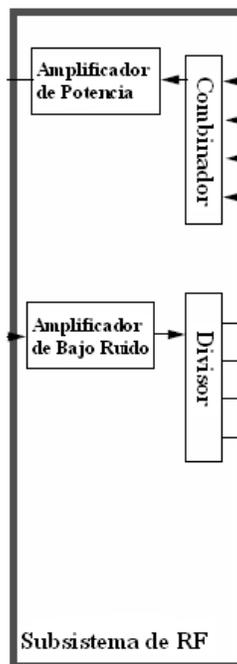


Figura 3-10: Subsistema de Radiofrecuencia.

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]
Estado sólido	C	50 – 350
	Ku	20 – 80
	Ka	10
TWT	C	150 – 12 000
	Ku	18 – 3 000
	Ka	20 – 100
Klystrón	C	400 – 3 400
	Ku	2 700 – 3 000
	Ka	350 – 450

Tabla 2: 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°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]
Paramétrico	Termoeléctrico	C	30
		Ku	90
	Sin enfriamiento	C	40
		Ku	100
GaAs FET	Termoeléctrico	C	50
		Ku	125
	Sin enfriamiento	C	75
		Ku	125
HEMT	Termoeléctrico	C	23 – 30
		Ku	50 – 70
		Ka	110
	Sin enfriamiento	C	23 – 50
		Ku	65 – 100
		Ka	150 – 300

Tabla 3: 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

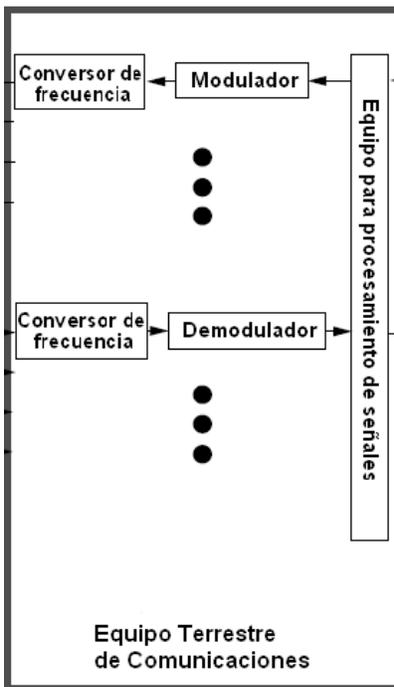


Figura 3-11: Subsistema de Comunicaciones de una estación terrena.

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

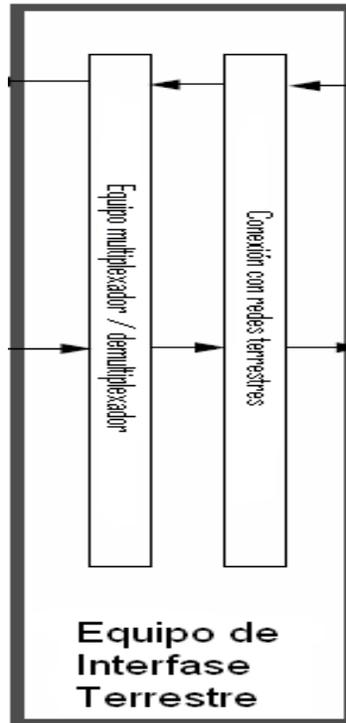


Figura 3-12: Subsistema de Interface Terrestre.

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.

Capítulo 4 Enlaces Satelitales

Los enlaces entre estaciones terrenas y los satélites o entre satélites están constituidos por radiación electromagnética dirigida en forma de haces, similares en algunas de sus características a los enlaces entre estaciones ubicadas sobre la superficie terrestre.

Existen tres tipos de enlaces:

- Enlace de subida de las estaciones terrenas a los satélites
- Enlace de bajada de los satélites a las bases terrenas
- Enlace intersatelital

Los enlaces de subida y de bajada consisten en portadoras de RF moduladas, mientras que los enlaces satelitales pueden ser tanto RF, como ópticas. Las portadoras son moduladas por señales de banda base por lo general cuando se trata de información para propósitos de comunicación. Las conexiones entre usuarios finales requieren de enlaces de bajada, enlaces de subida y posiblemente uno o varios enlaces satelitales.

Para lograr que los enlaces por satélite cumplan con los requisitos de una determinada red de comunicación deben considerarse las características del equipo de las estaciones terrenas y los transpondedores de los satélites que forman parte de la misma, las del medio de propagación y los efectos de radiaciones no deseadas de origen externo. La banda de frecuencia en que opere una red determinada hace que algunos de los factores mencionados tengan una importancia menor o mayor en el diseño de los enlaces.

El diseño correcto de un enlace satelital asegura la recepción de una señal de buena calidad, evitando el desperdicio de recursos técnicos y económicos, y optimizando la capacidad del satélite y estaciones terrenas.

La señal emitida por la estación transmisora debe llegar a la receptora con la potencia suficiente para garantizar la calidad esperada de la comunicación, a pesar de las pérdidas y el ruido introducidos en su propagación y recepción, de tal forma que en el punto de destino la relación de la potencia de la portadora al ruido acumulado que se simboliza por C/N , incluyendo todas las fuentes de interferencia, que tenga el valor requerido para la red considerada. La relación C/N mínima útil depende del tipo de información, su acondicionamiento, su modulación y si está codificada o no.

De hecho, la finalidad última del diseño de un enlace completo, incluyendo los tramos de subida y de bajada, es cumplir con el valor específico de C/N requerido, o con otra relación equivalente que en el caso de señales digitales es frecuentemente E_b/N_0 o energía por Bit de información transmitido entre la densidad de ruido.

Este proceso desglosado se explica de la siguiente manera:

En la estación terrena transmisora importan el amplificador de potencia y la antena que radia la señal portadora amplificada. Cuando la señal llega al satélite, hay que considerar las características de la antena receptora y del preamplificador de bajo ruido conectado después de ella. En el trayecto de subida, la señal portadora sufrirá atenuación por propagación en el espacio libre, por

absorción en la atmósfera, por lluvia, por despolarización, y por apuntamiento o desalineación de los ejes de las antenas de transmisión y recepción. Asimismo, dentro de su propio ancho de banda, tal vez recibirá interferencias de RF y, sin lugar a dudas, la introducción de ruido. Si se le descuentan las atenuaciones a la señal de RF original que sale de la antena transmisora de la base terrena y se le añade la ganancia de la antena receptora del satélite se obtiene C. El ruido acumulado se puede englobar como un ruido total equivalente N, que se toma después de la antena receptora. Conociendo la potencia C y la potencia de ruido total N, se obtiene el cociente $(C/N)_s$; el subíndice s indica que corresponde a un enlace de subida.

La señal portadora, junto con todo el ruido acumulado, es procesada en el interior del satélite, y poco antes de partir de regreso hacia la Tierra, es amplificada en el transpondedor que le corresponde, por su propio amplificador de potencia. Si hay más de una sola portadora dentro del amplificador, irremediablemente se producirá ruido de intermodulación. A mayor de salida del amplificador, habrá mayor ruido de intermodulación, por lo que, a bordo del satélite, se define un cociente de potencia de la portadora sobre el ruido de intermodulación, designado como $(C/N)_i$. el índice i indica la etapa de intermodulación, y el valor del cociente de potencias lo especifica, por medio de tablas y gráficas, el propio fabricante del satélite.

Como tercera y última etapa se tiene al enlace de bajada. Aquí sucede lo mismo que con el enlace de subida. La señal portadora parte revitalizada de la antena transmisora del satélite, después de haber sido amplificada por el amplificador de potencia del transpondedor y la ganancia directiva de la antena del satélite. Conforme desciende, se atenúa por las mismas razones que en el enlace de subida, y al llegar a la estación receptora, después de ser amplificada por la antena, queda “algo” de potencia inmediatamente antes de la entrada del amplificador de bajo ruido. Se introducirá ruido de diversas fuentes dentro del ancho de banda de RF de la señal portadora, y se puede calcular otro cociente de potencias $(C/N)_b$, en donde b indica que se trata del enlace de bajada. Se debe recordar que la frecuencia de la portadora en el enlace de bajada es diferente a la del enlace de subida, de modo que los niveles de atenuación y de ruido también son diferentes.

Como se puede ver, para el cálculo del cociente $(C/N)_{\text{Total}}$, es necesario tomar en cuenta muchas variables y características del medio, por lo que, antes de explicar cómo se calcula un enlace, es importante conocer ciertos conceptos que serán utilizados antes de explicar el procedimiento correspondiente.

4.1 Potencia radiada

Ya se explicó las características de las antenas, en las estaciones terrenas y en los satélites, por lo que se sabe que éstas tienen una ganancia máxima que depende de su área efectiva y la longitud de onda de operación.

Si la antena transmisora no fuera directiva, sino isotrópica, entonces la potencia de transmisión P_T se distribuiría de manera uniforme en un frente de onda esférico, a una distancia o radio r desde la antena, la superficie esférica sobre la que dicha potencia estaría distribuida tendría un área igual a $4\pi r^2$, y por cada unidad de superficie habría una cierta densidad de flujo de potencia (nivel de iluminación), F_d , igual a:

$$F_d = \frac{P_T}{4\pi r^2} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Sin embargo, la antena transmisora no es isotrónica, sino directiva, con una ganancia G_T , que es máxima en la dirección hacia el satélite, siempre y cuando esté bien orientada. Esta ganancia aumenta la densidad de flujo de potencia, por lo que, en la dirección hacia el satélite realmente es igual a:

$$F_d = \left(\frac{P_T}{4\pi r^2} \right) G_T \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Como ya se sabe, el PIRE, potencia isotrónica radiada efectiva, es la potencia efectiva que es radiada inicialmente, y es calculada con el producto:

$$PIRE = P_T G_T \text{ [W]}$$

Suele ser representada en decibeles siendo:

$$[PIRE]_{dBW} = 10 \log P_T + 10 \log G_T \text{ [dBW]}$$

Conociendo la ganancia de la antena en decibeles suele ser $10 \log G_T = [G_T]_{dBi}$

Ahora, al colocar una antena con área efectiva de recepción A_{ef} frente a la onda viajera con una densidad de flujo de potencia F_d , se obtiene la potencia capturada por la antena receptora:

$$\text{Potencia interceptada o recibida} = (F_d) (A_{ef}) \text{ [W]}$$

Utilizando los conceptos de antenas vistos anteriormente, considerando a la antena receptora con una ganancia G_R y cambiando a la potencia interceptada o recibida por C , siendo la señal portadora transmitida desde la base terrena, tenemos que:

$$C = (F_d)(A_{ef}) = \left(\frac{P_T G_T}{4\pi r^2} \right) \left(\frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \right) = (PIRE)(G_R) \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 r^2} \right] \text{ [W]}$$

Al tercer término de la ecuación se le conoce como ganancia debido a la propagación en el espacio libre y como se puede ver es muy pequeña debido a la longitud de onda y el valor r que es de miles de kilómetros.

Las pérdidas de potencia más grandes en un enlace satelital ascendente o descendente se deben a la enorme distancia que hay entre el satélite y las estaciones terrenas. Aunque su valor exacto depende de la frecuencia, tales pérdidas son del orden de 200 dB en la subida y otros 200 dB en la bajada para satélites geoestacionarios. A dicha disminución de potencia debida a la distancia viajada por una señal portadora se le refiere como atenuación por propagación en el espacio libre (FSPL). Siendo la atenuación el inverso de la ganancia, tenemos que:

$$FSLP = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2$$

Por lo tanto:

$$C = \frac{(PIRE)(G_R)}{FSLP} \text{ [W]}$$

En decibeles quedaría:

$$[C_{dBW}]_{subida} = [PIRE]_{dBW} + [G_R]_{dBi} - [FSLP]_{dB}$$

Para el caso del enlace de bajada, se tienen los mismos parámetros. Ahora el satélite tiene un PIRE, igual al producto de la potencia de salida del amplificador de cierto transpondedor por la ganancia de su antena transmisora:

$$PIRE_{satélite} = (P_{Ttranspondedor})(G_T)_{satélite}$$

Las pérdidas por propagación en el descenso se calculan usando la frecuencia de bajada, y la potencia de la portadora recibida por la estación terrena:

$$[C_{dBW}]_{bajada} = [PIRE_{satélite}]_{dBW} + [G_{Estación\ terrena}]_{dBi} - [FSLP]_{dB}$$

Para efectos prácticos, el FSLP se expresa como:

$$FSLP = \left(\frac{4\pi r f}{c}\right)^2$$

Debido a que se acostumbra calcular un enlace a una frecuencia de operación determinada y no a cierta longitud de onda.

El rango satelital, es la distancia r que hay entre una estación terrena y un satélite. Esta distancia se calcula geoméricamente utilizando el ángulo de elevación θ , las coordenadas geográficas de la base terrena y la posición del satélite geoestacionario.

Primero se obtiene el ángulo de cobertura θ' :

$$\theta' = \arccos [\cos \ell \cos \Delta L]$$

Con este ángulo se calcula el rango satelital S :

$$S = 35,786\sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos \theta'} \quad [km]$$

Para mayor exactitud, habría que tomar en cuenta la altitud de la estación sobre el nivel del mar. Sin embargo, la diferencia que se obtiene en el rango S es muy pequeña y generalmente se desprecia en los cálculos de niveles de potencia. En cambio, para los cálculos de atenuación por lluvia sí es muy importante considerar dicha altitud.

4.2 Pérdidas y efectos de la propagación

Además de las pérdidas en la propagación por el espacio libre, existen otras causas que provocan una atenuación en las señales transmitidas entre una estación terrena y un satélite. Las principales son:

- Pérdidas por desapuntamiento
- Pérdidas por conectores
- Atenuación atmosférica
- Centelleo
- Desacoplo de polarización
- Rotación de Faraday

La atenuación atmosférica comprende efectos como la absorción, la atenuación por lluvia, nieve, granizo, niebla, etc.

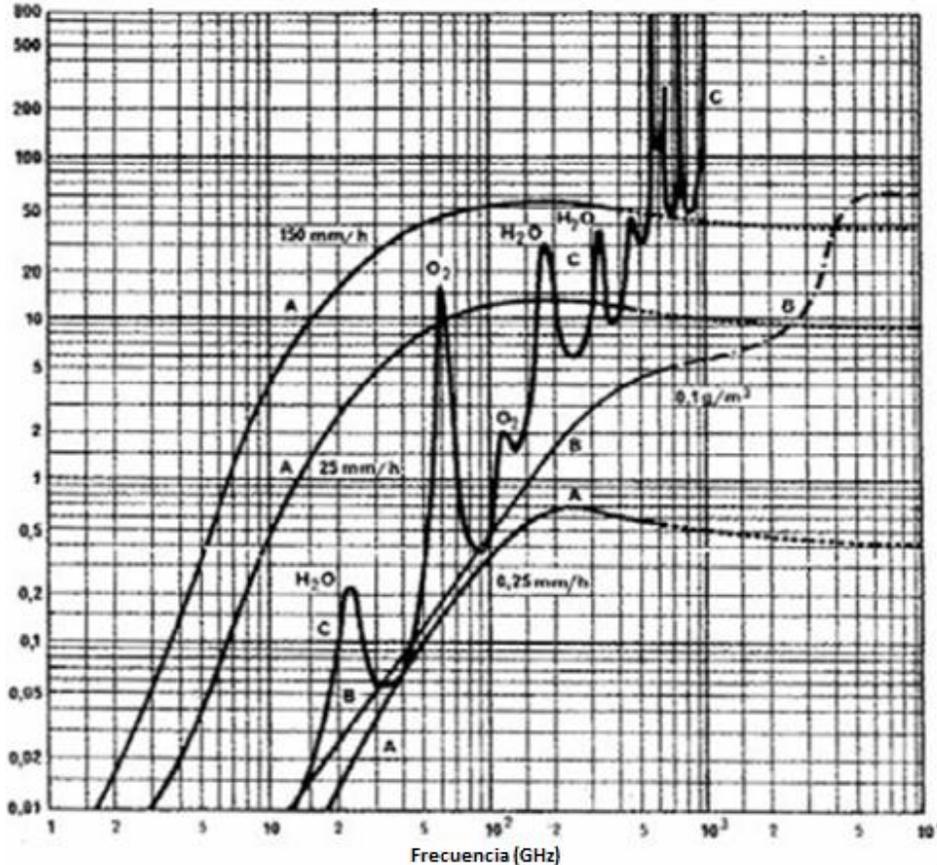


Figura 4-1: Efectos de atenuación en la atmósfera vs frecuencia. A) Lluvia, B) Niebla y C) Componentes Gaseosos.

En la parte baja de la atmósfera se produce absorción de las ondas de radio, la cual depende de los parámetros que pueden ser fijos, como la frecuencia de la portadora, el ángulo de elevación de la antena y la altura de cada estación terrena sobre el nivel del mar, y variables como la densidad del vapor contenido en el aire y la temperatura al nivel del terreno. El factor más inestable es la densidad del vapor, que puede tener fluctuaciones de efecto considerable.

La absorción en la atmósfera está siempre presente y es parte de las condiciones de propagación a cielo despejado que se encuentra en ausencia de fenómenos hidrometeorológicos. Las pérdidas por esta causa son bajas a los ángulos usuales de elevación de la trayectoria de un enlace, a los cuales pueden ignorarse a frecuencias hasta de 10 GHz y alcanzan menos de 0.5 dB hasta 15 GHz. Sin embargo, a bandas de frecuencias alrededor de 22.2 y de 57 MHz ocurren las primeras resonancias del vapor de agua y del oxígeno, respectivamente, en las que la absorción atmosférica puede ser muy alta, por lo que no se usan para enlaces ascendentes o descendentes, pero pueden emplearse para enlaces intersatelitales.

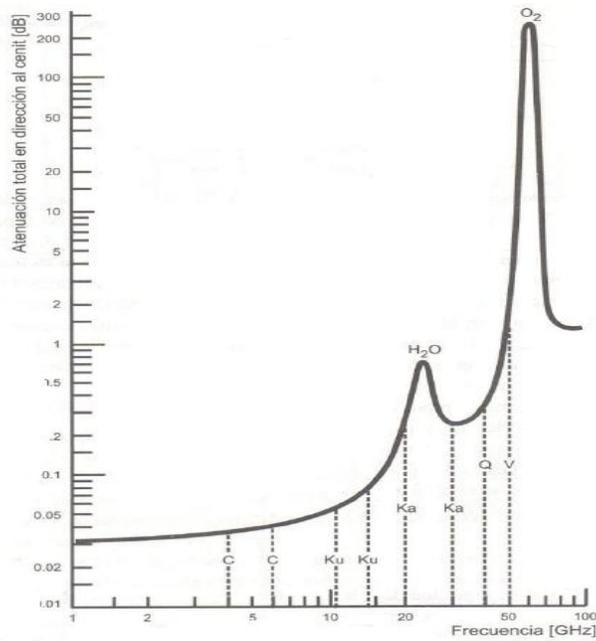


Figura 4-2: Absorción atmosférica vs frecuencia.

La degradación ocasional más importante de la relación C/N se debe a la pérdida de potencia originada por la lluvia. Las atenuaciones por lluvia (Figura 4-3) a las frecuencias altas son función obviamente de su intensidad, crecen en forma muy rápida con la frecuencia hasta 50 GHz y son mayores a ángulos bajos de elevación de las antenas de las estaciones terrenas.

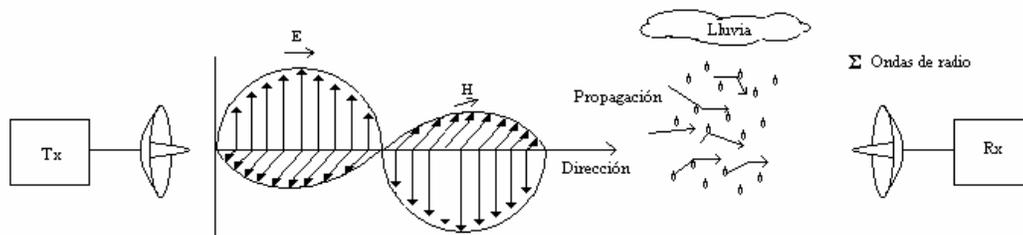


Figura 4-3: Efecto de Atenuación por Lluvia.

Existen complejos modelos de predicción para calcular la atenuación debida a la lluvia. El problema reside en que no se utilizan en suficiente medida pluviómetros capaces de medir y registrar la precipitación en lapsos de 1.5 o 10 minutos, esto no permite obtener datos estadísticos fiables sobre la atenuación a largo plazo que se hayan medido en un ángulo de elevación y en una frecuencia determinada siguiendo un modelo general de predicción.

A menudo el operador de cada sistema nacional de satélites comerciales proporciona a los usuarios de capacidad satelital la información sobre márgenes de potencia necesarios, por cada ciudad o zona del país del que se trate, para lograr los objetivos de disponibilidad de tiempo de comunicación en un año medio elegidos al planificar sus redes.

La lluvia produce, además de la atenuación de la señal útil, otros dos efectos de deterioro de enlaces: aumenta la llamada temperatura de ruido en las antenas receptoras y hace girar en cierta medida la polarización de las ondas cuya consecuencia más notable es la interferencia en la polarización cruzada por transpolarización cuando se emplea reutilización de frecuencias mediante dos

polarizaciones lineales en la misma banda, a este último efecto se le conoce como desacople de polarización.

El desacople de polarización es de poca consideración para las polarizaciones lineales horizontal y vertical, al compararlo con el causado en la polarización circular o en la polarización lineal a otros ángulos. La recepción de la portadora en que ocurre la despolarización tiene una pérdida que es despreciable hasta 10° o más de giro, pero la interferencia en la polarización ortogonal puede ser importante con solo 2° o menos.

La variación de la densidad de la atmósfera con la altura y sus variaciones por discontinuidades y turbulencias produce refracción de las ondas, con el resultado de que la trayectoria de propagación se desvía levemente en su recorrido, produciendo múltiples trayectorias que llegan a un punto de recepción con diferencias menores de longitud del trayecto y en la fase. Como resultado de la suma vectorial de las ondas recibidas de distintas trayectorias puede producirse reforzamiento o cancelación parcial de la señal en forma de desvanecimientos o fluctuaciones rápidas conocidas como centelleo.

Este efecto depende de diversos parámetros y se da tanto en la tropósfera como en la ionósfera. Es mayor en las frecuencias altas y en ángulos de elevación bajos. También es mayor en las regiones tropicales, en verano y en tiempo nublado.

En frecuencias alrededor de 11 GHz, puede haber variaciones de la amplitud de la señal de 0.3dB el 1% del tiempo y en 20 GHz las variaciones cresta a cresta son generalmente menores de 1 dB para ángulos superiores a 10° .

En el caso del centelleo en la ionosfera, capa inestable de partículas ionizadas a más de 150 km de altura, varía considerablemente con la fase del ciclo de las manchas solares, con la hora del día y con otros factores. En este caso, el mayor efecto se produce en bandas muy bajas, con menor intensidad entre 1 y 6 GHz y excepcionalmente a mayores.

Tanto el centelleo troposférico como el ionosférico tienen en común su bajo valor durante la mayor parte del tiempo en los ángulos de elevación más comunes y duraciones muy cortas en las ocasiones en que alcanzan mayor intensidad. Por tanto, es usual que en condiciones de cielo despejado los enlaces queden protegidos para este propósito a las frecuencias altas con los márgenes de potencia reservados para las condiciones de lluvia.

Otro efecto importante en la ionósfera es la rotación de Faraday o rotación de la polarización. Este efecto es importante a frecuencias inferiores a 1 GHz, por lo que a dichas frecuencias es preferible emplear redes de polarización circular. La rotación de Faraday es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia y proporcional a la integral del producto de la densidad de electrones en la ionósfera por el componente del campo magnético terrestre en la dirección del trayecto de propagación. Su valor mediano presenta variaciones diurnas, estacionales y de ciclo solar sumamente regulares que pueden predecirse, aunque durante breves lapsos se pueden presentar desviaciones irregulares muy notables. Las variaciones regulares del valor mediano, si las circunstancias lo hacen conveniente, pueden ser compensadas por medio de ajustes de la polarización en la estación terrena receptora.

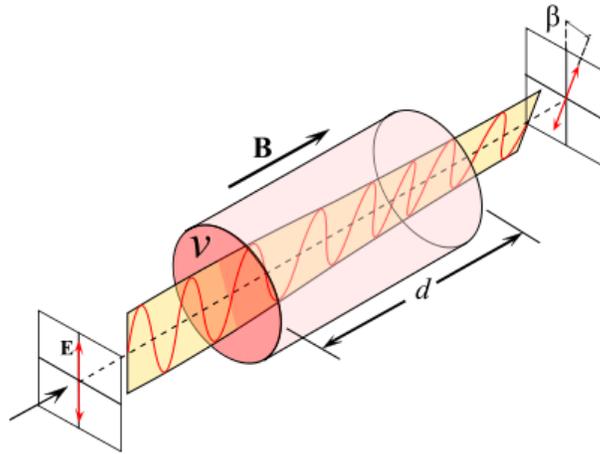


Figura 4-4: Rotación de Faraday.

4.2.1 Pérdidas por desapuntamiento

Las antenas, como es bien sabido, siguen un principio de reciprocidad, por lo que la ganancia de una antena es igual tanto para recibir como para transmitir, al igual que lo es su patrón de radiación. De modo que, bajo la óptima condición ideal en que dos antenas de un enlace satelital, por lo general antenas parabólicas, estuviesen frente a frente, con sus ejes de máxima variación alineados, se dice que los ejes de las antenas están alineados y, por lo tanto, las ganancias máximas de ambos extremos del enlace son aprovechadas.

Sin embargo, esta orientación coaxial casi nunca se logra en la práctica, además de que los movimientos del satélite en su ventana de posicionamiento y pequeños errores de orientación de las antenas terrestres causan que en cada enlace se pierda algo de ganancia con relación a la idónea. Estas pérdidas por desapuntamiento pueden ser calculadas con las expresiones:

$$L_{Transmisor} = L_T = 12 \left(\frac{\alpha_T}{\theta_{-3dB}_T} \right)^2 [dB]$$

$$L_{Receptor} = L_R = 12 \left(\frac{\alpha_R}{\theta_{-3dB}_R} \right)^2 [dB]$$

$$\left(0^\circ \leq \alpha \leq \frac{\theta_{-3dB}}{2} \right)$$

En donde α_T es el ángulo en grados entre los ejes de la antena terrestre transmisora y la antena del satélite; α_R es el ángulo entre los ejes de la antena terrestre receptora y la antena del satélite; y θ_{-3dB} es el ángulo entre los dos puntos de media potencia del lóbulo principal del patrón de radiación de la estación terrena.

Usando estas expresiones se puede obtener el valor de la ganancia de la antena en una cierta dirección desviada α grados con relación a la dirección de ganancia máxima, es decir:

$$[G_\alpha]_{dBi} = [G_{m\acute{a}x}]_{dBi} - 12 \left(\frac{\alpha}{\theta_{-3dB}} \right)^2 [dBi]$$

Esto nos indica que las pérdidas de ganancia deben ser restadas a la potencia de una señal portadora al hacer los cálculos de enlace en RF. Si uno tuviera que calcular las pérdidas por desapuntamiento en transmisión y recepción para cientos de estaciones de una red, sería muy tedioso, además de que antes habría que obtener con precisión todos los ángulos de desapuntamiento. Afortunadamente, toda esta información ya está incluida en los contornos de PIRE y G/T. Lo único que no está incluido en dichos contornos son los errores manuales de orientación o desviaciones debidas al viento en los platos terrestres, así como desapuntamientos de las antenas del satélite debidos a ligeras alteraciones de su estabilidad y orientación. Estas pérdidas son del orden de unas cuantas décimas de dB.

4.2.2 Pérdidas en los conectores

Cuando una estación terrena transmite hacia un satélite, o cuando un satélite transmite hacia la Tierra, la señal es atenuada por la línea que une al amplificador de microondas con el alimentador de la antena. Por lo tanto, la línea y los conectores asociados añaden una pérdida de potencia L , que depende de la frecuencia, el tipo de cable o guía de ondas, la longitud de la línea, los conectores y el material del que estén hechos. En recepción, así se trate de un satélite o de una estación terrena, lo anterior también aplica, ya que hay líneas y conectores entre la antena receptora y el preamplificador de bajo ruido. De modo que hay pérdidas tanto en el tramo ascendente como en el descendente, y deben ser tomadas en consideración al diseñar un enlace completo. Por cada tramo de guía y sus conectores es típico considerar entre 0.5 y 1 dB de pérdidas para realizar cálculos preliminares. Estos a su vez producen ruido que se superpone a las señales transmitidas.

4.3 Ruido en un enlace satelital

Ruido es cualquier señal no deseada que tiene frecuencias o armónicas dentro de la misma banda útil de un sistema de comunicaciones, que tiende a enmascarar a la señal deseada, pues sus potencias se superponen. Si la señal deseada no es lo suficientemente alta o fuerte que el ruido, el simple hecho de que el receptor amplifique no servirá para nada, ya que dicho aparato amplifica por igual tanto a la señal deseada como al ruido; la proporción de potencias entre ambos seguiría siendo la misma o aún peor, ya que todo equipo electrónico añade ruido interno al sistema de comunicaciones. Por lo que un enlace satelital bien diseñado debe garantizar que la proporción de potencias entre la señal deseada o portadora y el ruido sea mayor o igual que cierto valor de umbral, de tal modo que la señal recuperada sea útil.

La principal fuente de ruido eléctrico en el equipo receptor y en los amplificadores que le sigan es debida al movimiento térmico aleatorio de los electrones en su interior. A dicho ruido aleatorio se le da el nombre de ruido térmico. La potencia N del ruido producido por una fuente de ruido térmico puede ser calculada con:

$$N = kTB \quad [W]$$

En donde k es la constante de Boltzmann e igual a 1.38×10^{-23} J/K, T es la temperatura de ruido equivalente, y B es el ancho de banda del ruido. La característica más importante de este ruido térmico es que tiene una distribución plana en el espectro de frecuencias. Esta propiedad hace que se le conozca como ruido blanco y permite definir una cantidad muy útil, que facilita los cálculos de los enlaces satelitales, conocida como densidad espectral de potencia de ruido. Se le representa como N_0 y es igual a:

$$N_0 = \frac{N}{B} = kT \quad \left[\text{Joules o } \frac{W}{Hz} \right]$$

Esto indica que, la densidad de ruido es la potencia de ruido que hay en un ancho de banda unitario, es decir, en un Hertz.

La temperatura de ruido equivalente se define por medio de dos experimentos:

Primero, se toma una resistencia que forma parte de un circuito eléctrico. El movimiento aleatorio de los electrones en la resistencia genera energía que se manifiesta con un voltaje que fluctúa aleatoriamente entre sus terminales; por lo tanto, dicha resistencia es un generador de ruido, de potencia N . Ahora bien, un amplificador puede ser representado por una resistencia equivalente que genere la misma cantidad de potencia de ruido. En resumen, el problema se reduce a sustituir o modelar al amplificador real (generador de ruido) por un amplificador ideal (que no genera ruido) con una resistencia en serie a la entrada (Figura 4-5).

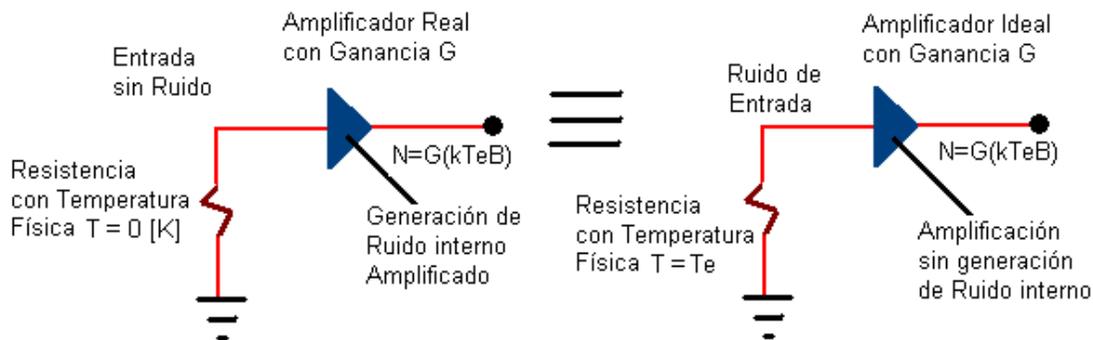


Figura 4-5: Principio de equivalencia de la temperatura de ruido a la entrada de un sistema amplificador.

La temperatura de ruido equivalente (T_e) es aquella temperatura que genera la misma potencia de ruido a la salida del amplificador ideal que la generada por el amplificador real cuando éste no tiene ruido a la entrada.

Al hablar de temperatura de ruido en un sistema, es importante mencionar que se deben de establecer puntos de referencia desde los cuales se miden o suman todas las temperaturas; no tiene sentido medir en todos los puntos de un sistema la temperatura de ruido. Para un sistema de comunicaciones satelitales se tienen dos puntos. Los puntos de referencia, deben de ser en la entrada del LNA para calcular todo el ruido presentado tanto en el enlace de subida como en el enlace de bajada.

Cuando un amplificador trabaja en la banda C, su fabricante por lo general aporta como dato la temperatura de ruido equivalente (T_e), que permite calcular rápidamente el ruido térmico referido a la entrada del amplificador. Sin embargo en las bandas Ku y Ka es más común que el fabricante indique la figura o factor de ruido del amplificador.

La figura de ruido se define como un cociente de potencias de ruido. En el numerador se tiene la potencia total de ruido a la salida del amplificador, y en el denominador está la componente o porción de dicha potencia que es producida por un ruido ya existente a la entrada del amplificador, asumiendo a la entrada una temperatura de ruido T_0 igual a la temperatura ambiente de referencia de 290 K. Es decir, ahora se toma en cuenta la situación más realista en la práctica, en la que ya hay cierto ruido a la entrada del amplificador, y que éste será amplificado junto con el rui-

do generado internamente, que referido al punto de entrada se calcula con la temperatura de ruido equivalente T_e .

Para obtener la expresión de la figura de ruido, de acuerdo a la definición, tenemos a la potencia total del ruido a la salida del amplificador, y en el denominador está la potencia que es producida por un ruido ya existente a la entrada del amplificador (ruido externo):

$$F = \frac{N_{salida\ amplificador}}{N_{exterior}} = \frac{G(kT_0B) + G(kT_eB)}{G(kT_0B)} = \frac{T_0 + T_e}{T_0} = 1 + \frac{T_e}{T_0}$$

$$T_e = T_0(F - 1)$$

Esta expresión nos indica que, mientras F sea cercana a 1 (0 dB), mejor será el amplificador, pues T_e disminuye. Por lo general, los preamplificadores de bajo ruido comerciales tienen una figura de ruido entre 1 y 5 dB, según la banda de operación.

Es común que un sistema de recepción consista en varios componentes electrónicos conectados en serie. Tomando un ejemplo sencillo de 2 componentes (Figura 4-6).

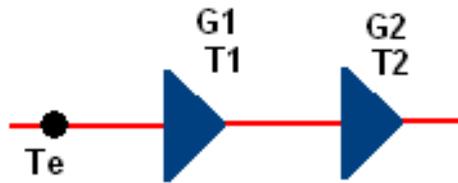


Figura 4-6: Dos amplificadores en cascada y temperatura de ruido equivalente del conjunto referida a la entrada del primer amplificador.

A la salida de la pareja, el ruido total del amplificador tiene una temperatura de ruido igual a:

$$T_{sal2} = (T_1 G_1) G_2 + T_2 G_2$$

Ahora si la temperatura de ruido total a la entrada de la pareja igual, considerada como un bloque, es T_e , entonces a la salida del bloque se tiene:

$$T_{sal2} = T_e (G_1 G_2)$$

Igualando ambas ecuaciones se obtiene:

$$T_e = T_1 + \frac{T_2}{G_1}$$

Para el caso de n amplificadores en cascada, tanto para T_e como para F, se tienen las expresiones generales:

$$T_e = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 G_2} + \frac{T_4}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{T_n}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

De esto es importante concluir que la principal contribución a la temperatura de ruido equivalente o efectivo del bloque proviene del primer amplificador, y que las contribuciones de las etapas siguientes son cada vez más pequeñas o despreciables. Por tal razón, siempre se procura que la primera etapa de amplificación del equipo de recepción produzca el mínimo ruido posible, y de allí el uso de un preamplificador de bajo ruido.

Un elemento que atenúa consiste solamente en componentes pasivos, que pueden ser considerados como resistencias. En esta categoría entran las líneas de transmisión o las guías de ondas y los conectores de las antenas, así como la lluvia. La temperatura de estas resistencias depende del grado de atenuación y de la temperatura ambiente o temperatura física que tengan.

La temperatura física es igual a la temperatura ambiente del elemento atenuador; para objetos en la superficie terrestre se considera, por lo general, igual a 290 K, para las nubes es de 270 K, y para la lluvia unos 280 K.

El ruido que la antena de una estación terrena captura a través del lóbulo principal y los lóbulos secundarios de su patrón de radiación, con diferentes intensidades y desde diversas direcciones, puede provenir de varias fuentes.

En general, las interferencias que se podrían introducir a través de los lóbulos laterales y el lóbulo posterior pueden ser minimizadas si la antena está bien diseñada; pero si el ángulo de elevación es muy bajo, las interferencias terrestres pueden ser significativas. Para evitar esto, siempre se busca un sitio de baja interferencia local para instalar la antena y, de preferencia, con algún tipo de blindaje natural o artificial. Esto ayuda a reducir el ruido que pudiera introducirse por los lóbulos laterales debido al bajo ángulo de elevación.

Fuente de ruido	Temperatura de ruido (K)
Ruido cósmico y galáctico	2.76 - 10
Atmósfera (tropósfera)	10
Lluvia	30
Tierra	10 – 50
Solar y lunar	Despreciable
Interferencia de enlaces terrestres	Variable

Tabla 4: Fuentes de ruido para una antena terrestre.

La temperatura de ruido depende de muchos factores y existen diversos métodos para calcularla. En realidad, la única forma de saber con exactitud la temperatura de ruido de una antena determinada es midiéndola, para diferentes ángulos de elevación, y que muy probablemente el dato medido cambie un poco día a día, en especial si el ángulo de elevación es muy bajo.

El cálculo de la temperatura de ruido de una antena receptora en el enlace de subida, es decir de la antena de un satélite, es mucho más simple y directo que para un enlace de bajada. Las antenas de los satélites apuntan hacia la Tierra y su haz principal de radiación generalmente es menos ancho que el disco terrestre visto desde la órbita geoestacionaria; por lo tanto, reciben toda la radiación térmica de la Tierra y entonces su temperatura equivalente de ruido es muy próxima a los 290 K. Esta temperatura no es precisamente igual para todos los satélites, porque depende de la frecuencia y del tipo de masa hacia donde la antena está orientada; por ejemplo, los continentes

radian más ruido que los océanos. Sin embargo, a menos que se tengan fuentes de datos más precisas, basta con suponer $T_A = 290$ K para todos los casos.

La presencia de lluvia en la Tierra no afecta mucho a la calidad del enlace de subida, porque la antena del satélite siempre está viendo hacia una “Tierra caliente” de 290 K, y esto más la alta temperatura de ruido del equipo receptor resulta en una temperatura de ruido tan alta que prácticamente enmascara cualquier ruido adicional que pudiese originarse por lluvia. En todo caso, si se detecta alguna degradación importante en la señal portadora recibida en su estación terrena de destino, debida a atenuación por lluvia en la subida, se le puede pedir a la estación transmisora que aumente el volumen al amplificador de potencia, por un rato, para compensar el desvanecimiento de la señal. Es importante hacerlo en coordinación con una estación central de control del sistema satelital.

Por último es conveniente recordar que difícilmente estará lloviendo al mismo tiempo en toda la zona de cobertura de un satélite. Esto quiere decir que solo algunas estaciones transmisoras tendrían que aumentar la potencia de subida bajo fuertes condiciones de lluvia.

4.4 Figura de merito o factor de calidad (G/T)

La figura de mérito o factor de calidad del satélite se define y calcula como:

$$\left[\left(\frac{G}{T} \right)_{satelite} \right]_{\frac{dB}{K}} = \left[\frac{(G_R)_{max}}{T_s} \right] - \text{Pérdidas por desapuntamiento y conectores en el extremo receptor}$$

El valor del G/T para cada satélite en particular depende de las características de su antena (ganancia y patrón de radiación), del número de transpondedores y demás elementos del subsistema de comunicaciones, así como de la posición de la estación terrena transmisora dentro de la huella de iluminación del satélite. De allí que para unos casos el G/T es cerca de 0 dB/K o negativo, o ligeramente positivo pero nunca demasiado grande. Por lo tanto, usando el factor de mérito y la densidad de ruido (N_0) tenemos:

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{subida} = PIRE - FSLP + \left(\frac{G}{T} \right)_{satelite} - 10 \log k$$

En la práctica, si se tienen disponibles los contornos de G/T del satélite, no es necesario conocer las características de la antena, los conectores, el amplificador de bajo ruido y transpondedores del mismo. Simplemente se interpola entre los contornos más cercanos a la ubicación de la estación terrena.

El cociente de potencias para el enlace de bajada quedaría así:

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{bajada} = PIRE - FSLP + \left(\frac{G}{T} \right)_{estación\ terrena} - 10 \log k$$

Los cálculos se simplifican si dicho cociente G/T es conocido para cada estación en particular, de acuerdo con la información del fabricante. Con este dato, ya no es necesario preocuparse en los cálculos por la temperatura de ruido de la antena o del amplificador de bajo ruido, ni lo de los conectores. Generalmente, cada operador de un satélite recomienda determinados valores de G/T

para las estaciones terrenas de sus clientes o usuarios, según el tipo de tráfico que deseen conducir, dentro de un rango de ángulos de elevación.

4.5 Contornos de PIRE

En general, no es imperativo conocer cuánta atenuación producen los conectores, guías de ondas y otros elementos que haya entre cada amplificador del satélite y la antena transmisora, porque el fabricante proporciona los mapas de contornos de PIRE con los niveles de dBW que son radiados hacia diferentes puntos de la zona de cobertura. Estos contornos ya incluyen las pérdidas mencionadas, así como el desapuntamiento, y esto facilita en gran medida los cálculos de enlace. Los satélites más poderosos de la actualidad radian fácilmente con un PIRE de orden de 60 dBW, pero también hay otros con menor PIRE, según las necesidades del dueño y los servicios que desee prestar.

Como se sabe, varios amplificadores o transpondedores están conectados con una misma antena. La potencia de salida máxima de cada amplificador, menos las pérdidas entre conectores, más la ganancia de la antena transmisora en diversas direcciones, dan el valor del PIRE. Como hay amplificadores con diferentes niveles de potencia de salida máxima, según su ancho de banda y frecuencia de trabajo, destinados para dar servicio en ciertas regiones específicas, es normal que un satélite moderno tenga varias huellas diferentes de PIRE.

Teniendo claro los datos para el cálculo de un enlace, solo hace falta conocer el procedimiento para el cálculo del cociente de potencias total.

4.6 Relación total de potencias e interferencias de un enlace satelital.

La potencia del ruido que se suma a una portadora en todo el trayecto del enlace proviene de varias fuentes. Para poder sumar todas las contribuciones hay que hacerlo empleando valores absolutos, usando un proceso similar al obtener el equivalente de varias resistencias en paralelo. El procedimiento a seguir es:

- 1) Convertir las relaciones parciales (C/N_0) de decibeles a valores absolutos.
- 2) Obtener sus recíprocos.
- 3) Sumar los recíprocos.
- 4) Obtener el recíproco de la suma anterior.
- 5) Convertir el resultado a decibeles.

Tomando en cuenta si hubiese algún grado de interferencia debida a enlaces de microondas terrestres o a satélites cercanos, además de intermodulación de la estación terrena y del transpondedor, la expresión quedaría de la siguiente manera:

$$\frac{1}{(C/N_0)_{total}} = \frac{1}{(C/N_0)_{intermodulación\ base\ terrena}} + \frac{1}{(C/N_0)_{subida}} + \frac{1}{(C/N_0)_{intermodulación\ transpondedor}} + \frac{1}{(C/N_0)_{interferencias}} + \frac{1}{(C/N_0)_{bajada}}$$

4.6.1 Relación de Interferencias

Como se mencionó anteriormente, en los enlaces satelitales el parámetro más importante está dado por el cociente C/N total, sin embargo, es necesario tomar en cuenta aquellas señales que interfieren con la portadora, considerando además al siempre presente ruido blanco.

Siendo las interferencias el elemento de interés, se considera lo siguiente:

$$\frac{1}{(C/N_0)_{total}} = \frac{1}{(C/N_0)_{subida}} + \frac{1}{(C/N_0)_{interferencias}} + \frac{1}{(C/N_0)_{bajada}}$$

Para trabajar con esta expresión, se asume que todas las señales interferentes, incluyendo el ruido en el enlace, son estadísticamente independientes. Por esto, para un enlace de subida se considera la suma tanto de las interferencias $i_{1,subida}(t)$ $i_{2,subida}(t)$... $i_{m,subida}(t)$ como del ruido $n_{subida}(t)$, expresados de la siguiente forma:

$$\mathcal{N}_{subida} = E \left\{ \left[n_{subida}(t) + \sum_{k=1}^m i_{k,subida}(t) \right]^2 \right\}$$

$$\mathcal{N}_{subida} = N_{0,subida} + \sum_{k=1}^m I_{k,subida}$$

Donde:

$N_{0,subida}$ es la potencia del ruido y $\sum_{k=1}^m I_{k,subida}$ es la suma de las potencias de las señales interferentes en el enlace de subida.

Obteniendo el cociente de potencias se llega a lo siguiente:

$$\frac{1}{(C/N)_{subida}} = \frac{1}{(C/N_0)_{subida}} + \sum_{k=1}^m \frac{1}{(C/I_k)_{subida}}$$

Considerando:

$$\frac{1}{(C/I)_{subida}} = \sum_{k=1}^m \frac{1}{(C/I_k)_{subida}}$$

Por lo tanto:

$$\frac{1}{(C/N)_{subida}} = \frac{1}{(C/N_0)_{subida}} + \frac{1}{(C/I)_{subida}}$$

Esta expresión es igual tanto para un enlace de subida como para un enlace de bajada debido, con la diferencia de que el número de señales interferentes puede variar, por lo tanto se considera que:

$$\frac{1}{(C/I)_{bajada}} = \sum_{k=1}^p \frac{1}{(C/I_k)_{bajada}}$$

Homólogo al enlace de subida se obtiene:

$$\frac{1}{(C/N)_{bajada}} = \frac{1}{(C/N_0)_{bajada}} + \sum_{k=1}^p \frac{1}{(C/I_k)_{bajada}} = \frac{1}{(C/N_0)_{bajada}} + \frac{1}{(C/I)_{bajada}}$$

Con estas expresiones se puede concluir que, para el cociente C/N, incluyendo las señales interferentes, se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_{total}} &= \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{I}\right)_{subida}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{bajada}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{I}\right)_{bajada}} = \\ &= \frac{1}{(C/N)_{subida}} + \frac{1}{(C/N)_{bajada}} = \frac{1}{(C/N_0)_{total}} + \frac{1}{(C/I)_{total}} \end{aligned}$$

Donde:

$$\frac{1}{(C/I)_{total}} = \frac{1}{(C/I)_{subida}} + \frac{1}{(C/I)_{bajada}}$$

La expresión para el $\left(\frac{C}{N}\right)_{total}$ es muy utilizada en la ingeniería de sistemas satelitales. Una vez que se escoge el tipo de modulación a utilizar, la razón portadora a ruido más interferencia o $\left(\frac{C}{N}\right)_{total}$ se utiliza para predecir el desempeño de un enlace.

Si existen señales interferentes no Gaussianas, el resultado podría no ser el correcto. Para estos casos se deben seguir ciertas condiciones. Cuando se tienen este tipo de interferencias y no tienen un efecto dominante, su función de densidad de probabilidad conjunta se aproxima a la función de densidad Gaussiana y una varianza igual a la suma de las varianzas individuales usando el teorema del límite central. Su efecto es aproximado al de un proceso de ruido blanco el cual produce el mismo cociente C/I.

Para el caso de un enlace satelital digital, la expresión con interferencias no Gaussianas es válida para un C/I grande (más de 20 dB) y la condición:

$$C/I > C/N$$

Donde C/I debe ser 3 dB mayor que C/N como mínimo. Siendo este un enlace con ruido dominante. Por el contrario, cuando C/I es menor que C/N, se dice que el enlace tiene interferencia dominante.

En la Figura 4-7, se observa que para obtener cierta probabilidad de bit en error, a mayor C/I se requiere menor C/N, siendo a 20 dB el punto mínimo de C/I para tener una buena probabilidad. Esto es para el caso de una sola señal interferente.

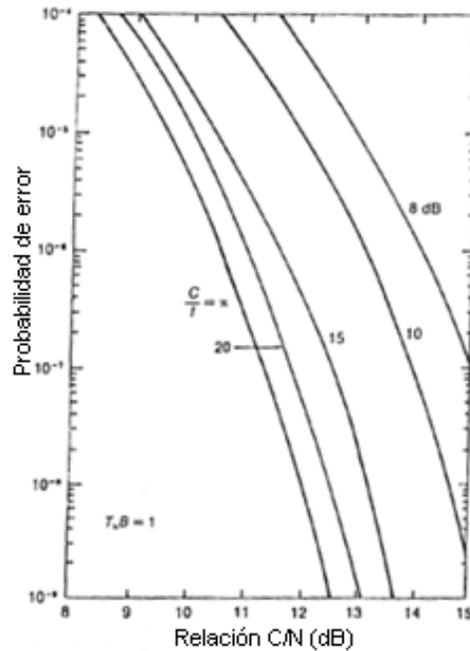


Figura 4-7: Probabilidad promedio de bit en error para PSK con una señal PSK interferente.

En el caso de la Figura 4-8, se muestra la probabilidad de bit en error para el caso de una portadora QPSK en presencia de ruido blanco y cuatro señales QPSK interferentes de igual amplitud. En ésta se muestra el C/I total de las cuatro interferencias. Se observa como las cuatro interferencias degradan más el desempeño del sistema que cuando se tiene una sola interferencia. La degradación es mayor cuando se tiene bajo C/I. Algo que ocurre frecuentemente cuando hay una severa atenuación por lluvias que provoca una reducción en la potencia de la portadora de manera considerable.

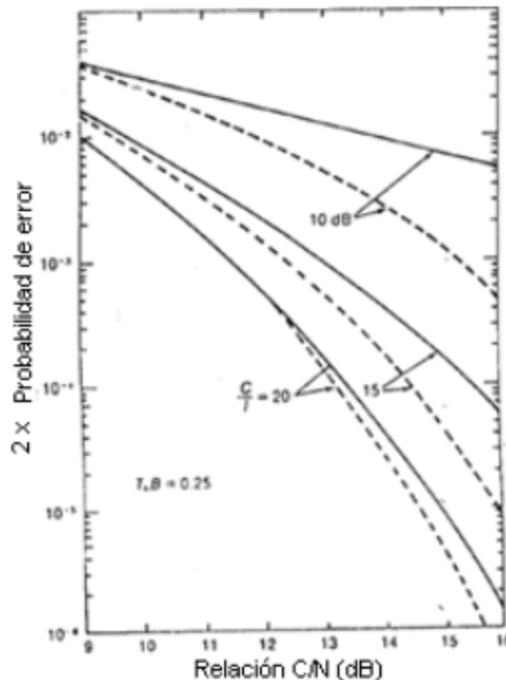


Figura 4-8: Probabilidad de bit en error para QPSK con una (líneas punteadas) y cuatro (líneas continuas) señales QPSK interferentes.

Existen distintas fuentes de interferencias que pueden afectar a un enlace satelital, ya sea provocadas por satélites adyacentes o por estaciones terrenas que operan con satélites cercanos, o inclusive con enlaces terrestres de microondas.

Como ejemplo de las interferencias que pueden presentarse se consideran dos sistemas satelitales A y B (Figura 4-9).

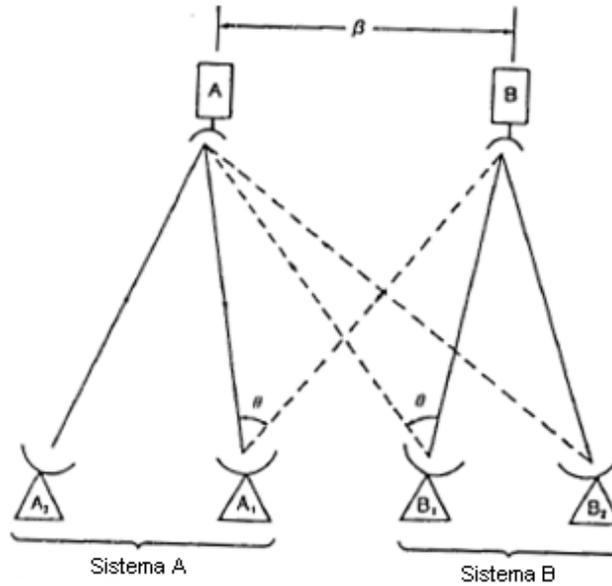


Figura 4-9: Interferencias entre sistemas satelitales (líneas punteadas).

Siendo A un sistema satelital existente y B un sistema satelital propuesto, entonces el enlace satelital entre las estaciones terrenas A_1 y A_2 es afectado por dos fuentes interferentes: la señal interferente de subida de las estaciones terrenas del sistema propuesto B, y las señales interferentes de bajada provenientes del satélite B. Teniendo en cuenta esto se puede obtener el $\left(\frac{C}{I}\right)_{total}$ debido a estas dos señales interferentes que representan las interferencias generadas por el sistema satelital B en el sistema satelital adyacente A.

Haciendo el análisis de la potencia de la señal interferente se tiene:

$$I_s = (PIRE') \left(\frac{c}{4\pi f'_s d'_s} \right)^2 G'_s$$

Donde $PIRE'$ = PIRE de la señal interferente en dirección del satélite A interferido.

f'_s = Frecuencia de la interferencia de subida.

d'_s = Rango satelital entre el satélite interferido A y la estación terrena interferente B_1 .

G'_s = Ganancia de la antena del satélite A en dirección de la estación terrena B_1

Considerando que tanto la frecuencia como el rango satelital de la portadora y la interferencia son iguales, se obtiene:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_s = \frac{C_s}{I_s} = \left(\frac{PIRE}{PIRE'}\right) \left(\frac{f'_s d'_s}{f_s d_s}\right)^2 \left(\frac{G_s}{G'_s}\right) \approx \left(\frac{PIRE}{PIRE'}\right) \left(\frac{G_s}{G'_s}\right)$$

Esto se puede expresar en decibeles:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_s = PIRE(dBW) - PIRE'(dBW) + G_s(dB) - G'_s(dB)$$

Asumiendo el nivel requerido para los lóbulos laterales, cumpliendo con lo que especifica la FFC, se tiene:

$$PIRE' = PIRE^*(dBW) - G_1(dB) + 29 - 25 \log\theta$$

Donde $PIRE^*$ = PIRE de la señal interferente en dirección del satélite interferente B

G_1 = Ganancia de la antena transmisora de la estación terrena B₁

Teniendo esto en cuenta se obtiene:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_s \approx PIRE(dBW) - PIRE^*(dBW) + G_1(dB) - (29 - 25 \log\theta) + G_s(dB) - G'_s(dB)$$

Análogamente, para el caso del enlace de bajada, es decir, entre el satélite interferente B y la estación terrena interferida A₁ se deduce:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_b \approx PIRE_1(dBW) - PIRE^*_1(dBW) + G(dB) - (29 - 25 \log\theta)$$

Donde $PIRE_1$ = PIRE del satélite interferido A en dirección de la estación terrena interferida A₁

$PIRE^*_1$ = PIRE del satélite interferente B en dirección de la estación terrena interferida A₁

G = Ganancia de la antena receptora de la estación A₁ en dirección al satélite B

Con esto para las interferencias totales entre sistemas satelitales se tiene:

$$\frac{1}{(C/I)_{total}} = \frac{1}{(C/I)_s} + \frac{1}{(C/I)_b}$$

Capítulo 5 Fuentes de interferencia en un sistema de comunicación satelital no relacionadas con otros sistemas satelitales

5.1 Generación de interferencias en amplificadores de potencia

5.1.1 No linealidad de los amplificadores de potencia

Cuando un amplificador de potencia entrega a su salida el máximo de potencia posible, se dice que opera en su punto de saturación; para que esto ocurra, la potencia total de las señales que entran a él debe tener un valor determinado. Sin embargo, cuando se trabaja en el punto de saturación, existe el riesgo de operar en estados no lineales de amplificación.

En estados lineales, la relación de potencia de la salida es la misma al aumentar o disminuir la potencia en la entrada, sin embargo, cuando se trabaja en un estado no lineal, la relación de amplificación es distinta, ya que después del punto de saturación, la potencia tiende a fluctuar debido a la inestabilidad del amplificador.

La no linealidad induce a tres tipos de efectos no deseados:

- La generación de señales no deseadas que interfieren con las señales deseadas. Estas señales no deseadas se pueden considerar como interferencia de ruido (ruido blanco) para el cálculo de (C/N_0) .
- La degradación del rendimiento promedio del BER en el caso de transmisiones digitales
- La reducción de la potencia de salida, debido a la necesidad de operar el amplificador en una región lineal.

Estos efectos pueden reducirse con el uso de linealizadores, por ejemplo, circuitos de predistorsión de gran ancho de banda localizados en la entrada del amplificador.

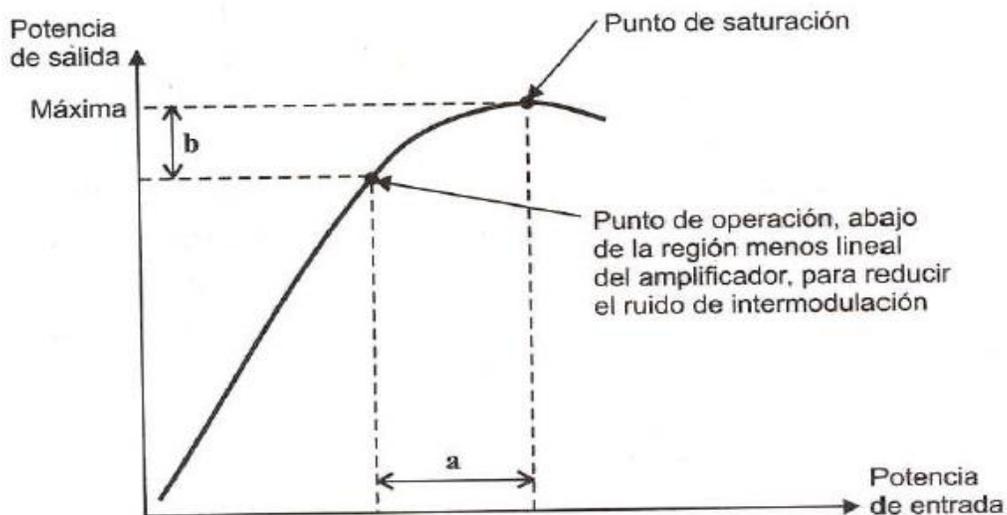


Figura 5-1: Curva característica no lineal de entrada-salida de un amplificador de potencia; a es la reducción necesaria de la potencia a la entrada respecto al valor que satura al amplificador, para poder trabajar en el punto de operación, y b es la reducción que se obtiene en la potencia de salida respecto a la potencia máxima que se obtendría en saturación.

La no linealidad no afecta sensiblemente la calidad de los enlaces que operan con una sola portadora. Sin embargo, en los casos en que se tienen varias portadoras transmitiendo a diferentes frecuencias en el ancho de banda del amplificador de potencia, las no linealidades suelen causar lo que se conoce como ruido de intermodulación provocando el surgimiento de señales no deseadas.

Debido a esto, es preciso operar los amplificadores 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. A la reducción de la potencia en la entrada se le conoce como "back-off" de entrada, y a la reducción a la salida se le llama "back-off" de salida. En la figura 5-1, se indican como **a** y **b** respectivamente.

5.1.2 Productos de intermodulación

Se conoce como productos de intermodulación a las nuevas componentes de frecuencias generadas a la salida de un dispositivo (en este caso particular, del amplificador de potencia) que opera en región de respuesta no lineal.

Son provocados por el inadecuado ajuste del punto de operación cuando se trabaja en modo de multiportadoras (siendo F_1 , F_2 , etc, las frecuencias de las señales portadoras), la regla de la intermodulación dice que los productos aparecerán en las frecuencias:

$$f = m_1 f_1 + m_2 f_2 + \dots + m_N f_N$$

Donde m_1, m_2, \dots, m_N son enteros positivos o negativos.

El entero:

$$m = |m_1| + |m_2| + \dots + |m_N|$$

Se conoce como orden del producto de intermodulación. Usualmente, cuando el ancho de banda en el que se opera es pequeño, comparada con la radiofrecuencia, solo los productos de orden impar caerán dentro del ancho de banda utilizado.

La potencia de los productos de intermodulación se decrementa con el orden, por lo que solo se llega a considerar los productos de tercer orden y, algunas veces, los de quinto orden. El número de los productos de intermodulación se incrementa muy rápido con el número de portadoras en la entrada.

Debido a estos productos, mientras más portadoras se quieran amplificar con el mismo dispositivo al mismo tiempo, será preciso operar en un punto cada vez más abajo del de saturación, y será menor la cantidad de potencia que se puede aprovechar a la salida.

5.1.3 Productos de intermodulación a la recepción

Estos son generados en la segunda etapa de mezclado del Transceptor, la siguiente fórmula se utiliza para calcular la frecuencia de estos productos:

$$F_{FI} = m f_{RF} \pm n f_{LO}$$

m y n son coeficientes enteros y la suma de ambos determinan el orden del producto de intermodulación.

Este tipo de intermodulación es generado por portadoras de alta densidad de potencia, y debido a esta particularidad los mezcladores de dos etapas en la sección de banda L a la recepción no pueden discriminar las armónicas que dicha portadora genera. Lo recomendable para evitar estos productos de intermodulación es utilizar transceptores de tres o más etapas, que permiten eliminar las señales armónicas.

5.2 Interferencias por Polarización Cruzada

Los sistemas de comunicación satelitales que utilizan el reuso de frecuencias empleando polarización ortogonal, ya sea lineal o circular tienen una fuente de interferencia originada como energía de acoplamiento desde un estado de polarización hacia otro estado de polarización ortogonal.

Por una parte se deben considerar la interferencia por polarización cruzada causada por una deficiente implementación de las antenas en las bases terrenas. El bajo aislamiento de las estaciones terrenas o VSAT es provocado por el inadecuado apuntamiento de la antena, el alimentador fuera del punto focal de la parábola, el mal diseño de la antena, deformaciones mecánicas en la parábola o en su estructura, así como un patrón de radiación fuera de las especificaciones técnicas. Por otro lado, existen factores no provocados que pueden afectar al sistema.

El uso de técnicas de reuso de frecuencias con polarización ortogonal, empleando tanto polarización lineal como circular en la transmisión, pueden verse afectadas de acuerdo a la ruta de propagación a través de la atmósfera terrestre, induciendo a una interferencia por polarización cruzada. Esto ocurre por la rotación de Faraday, y por las precipitaciones, ya sea por la lluvia o por cristales de hielo.

Como se vio anteriormente, la rotación de Faraday provoca una variación en la orientación del plano de polarización. Los picos de esta rotación pueden ser hasta de 9° a 4 GHz y 4° a 6 GHz. Si esta desviación es significativa de acuerdo a la frecuencia de operación, se deben rotar los planos de polarización (Las antenas, generalmente, tiene un polarizador) para disminuir los efectos en la antena de la estación terrena. Sin embargo se debe de considerar que los efectos de la rotación en la transmisión son contrarios en la recepción, por lo que se deben considerar los dos casos.

La despolarización inducida por la lluvia es causada por gotas de lluvia no esféricas, que producen una diferencia en la atenuación y un corrimiento en fase entre las componentes lineales de la señal que degrada la ortogonalidad entre las señales polarizadas. El corrimiento en fase es el factor que más afecta a la despolarización, sin embargo, a frecuencias mayores de 10 GHz, la diferencia en la atenuación se convierte en un factor de importancia debido a la pequeña longitud de onda que se tiene en altas frecuencias, con respecto a las dimensiones de las gotas de lluvia o cristales de hielo.

Para el caso de la banda C, el efecto de la lluvia es despreciable, por lo tanto la interferencia por polarización cruzada es determinada por la discriminación de las antenas de la estación terrena y el satélite. Esta discriminación está definida por la razón de la potencia recibida en la polarización principal y la potencia recibida en la polarización ortogonal en la misma señal incidente, y esto representa la razón portadora a interferencia de polarización cruzada donde las dos señales pola-

rizadas tienen la misma potencia. Las antenas de alta calidad pueden obtener esta razón de 30 a 40 dB, en la dirección de máxima radiación. La discriminación de la polarización cruzada neta de un enlace satelital es igual al efecto combinado de las antenas de una estación terrena y del satélite tanto para el enlace de subida como para el enlace de bajada. Siendo X_e y X_s los discriminadores de polarización cruzada para las antenas de la estación terrena y el satélite, respectivamente. Entonces se tiene que el mínimo discriminador de polarización cruzada neta en el enlace está dado por:

$$X_{min} = \frac{1}{2}(X_e^{-1} + X_s^{-1})^{-1}$$

Esta expresión representa el peor caso de la razón portadora a interferencia de polarización cruzada:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_X = X_{min}$$

La cual puede ser adicionada como fuente de interferencia para la obtención del $\left(\frac{C}{I}\right)_{total}$

5.3 Interferencia de Canales Adyacentes

Otra fuente de interferencias en un enlace satelital es la interferencia de canales adyacentes (o interferencia de transpondedores adyacentes) que aparece en satélites con canales de banda limitada.

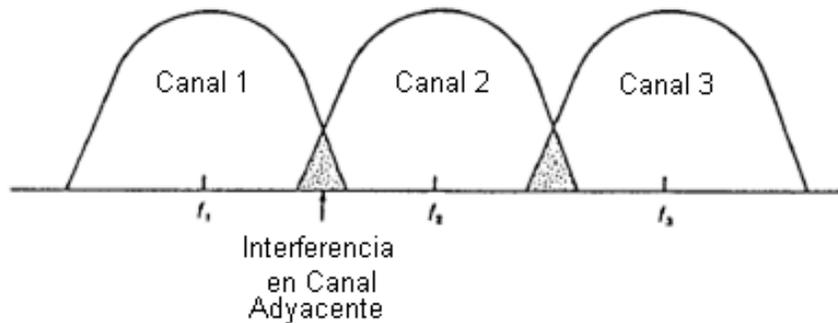


Figura 5-2: Interferencia en canales adyacentes.

La interferencia nace cuando cierta cantidad de la energía de una señal de banda limitada cae en canales adyacentes, debido al traslape de las características de amplitud de los filtros de canal. La situación es más grave en sistemas TDMA de un portadora por canal usando modulación QPSK, en estos casos, la estación terrena utiliza amplificadores de alta potencia y los satélites, por lo general, utilizan amplificadores TWT operando cerca o en el punto de saturación. Las características de no linealidad de estos amplificadores de potencia generan lóbulos laterales durante el filtrado los cuales provocan la interferencia en canales adyacentes. Este fenómeno se conoce como espectro disperso. El grado de dispersión varía de acuerdo al punto de operación del amplificador de potencia. El espectro disperso de un amplificador de potencia en la estación terrena determina la magnitud de la interferencia en canales adyacentes en el enlace de subida, por lo que puede ser reducido modificando el punto de operación. Por otro lado, los amplificadores TWT en los satélites, son los causantes de la interferencia en canales adyacentes en el enlace de bajada, ésta puede ser controlada utilizando un multiplexaje que no permita el paso de la señal fuera de banda.

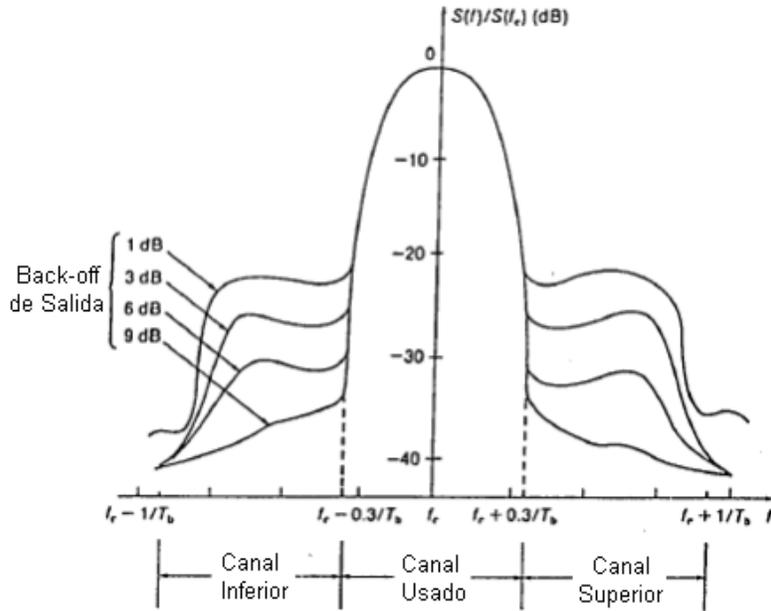


Figura 5-3: Espectro disperso debido a la no linealidad del amplificador de alta potencia.

La relación portadora a interferencia en canales adyacentes (en dos canales adyacentes idénticos) para el enlace de subida está dada por:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_s = \frac{\int_{f_c-B/2}^{f_c+B/2} S_s(f)df}{4 \int_{f_c-B/2}^{f_c-\Delta/2} S_s(f)df}$$

Donde $S_s(f)$ = densidad espectral de potencia de una portadora QPSK a la salida de un amplificador de alta potencia de una estación terrena (W/Hz) y Δ = separación en frecuencia de las portadoras adyacentes (Hz).

Para el caso de la relación portadora a interferencia en canales adyacentes para el enlace de bajada está dada por:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_b = \frac{\int_{f_c-B/2}^{f_c+B/2} S_b(f)|H(f)|^2df}{4 \int_{f_c-B/2}^{f_c-\Delta/2} S_b(f)|H(f)|^2df}$$

Donde $S_b(f)$ = es la densidad espectral de potencia de una portadora QPSK a la salida del amplificador TWT en el satélite (W/Hz) y $H(f)$ = respuesta en amplitud del multiplexor de salida del satélite.

Estas ecuaciones pueden ser utilizadas como interferencias adicionales para el cálculo de la $\left(\frac{C}{I}\right)_{total}$. El punto de operación de un amplificador de alta potencia de 2 a 6 dB es necesario para tener una relación de portadora a interferencia de canal adyacente mayor a 25 dB.

5.4 Procesos que pueden generar interferencia durante la transmisión en el enlace ascendente

5.4.1 Ruido de fase

Cuando se transmite una sola portadora, el trabajar en estados no lineales puede provocar lo que se conoce como ruido de fase. Se llama ruido de fase de una señal periódica a las variaciones aleatorias de su fase instantánea con respecto a la de una señal ideal. Otra causa de este efecto son las variaciones que existen en las fuentes de alimentación de voltaje

Se mide de dos maneras:

- Relación de la densidad de potencia del ruido alrededor de la frecuencia central con respecto a la potencia de la señal, expresada en decibeles-portadora por Hertz [dBc/Hz].
- Desviación estándar del período de la señal, expresada en segundos [s]

5.4.2 Conversiones AM/AM

Las conversiones de “modulación en amplitud a modulación en amplitud”, son distorsiones en amplificadores de microondas, generadas por los cambios de la salida del voltaje de RF. Se determinan comparando la distorsión en la salida con la amplitud en la entrada (Figura 5-4).

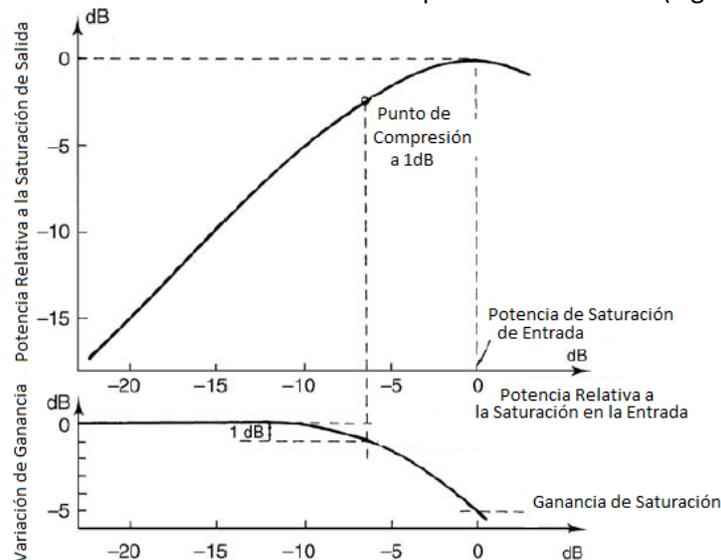


Figura 5-4: Variaciones de la amplitud en la salida y su relación con la variación en la ganancia.

5.4.3 Conversiones AM/PM

Las conversiones de “modulación en amplitud a modulación en fase” son distorsiones en microondas debido al cambio en el ángulo de la fase del voltaje de RF entre la señal de entrada y la señal de salida (Figura 5-5). Este efecto es particularmente dañino en el caso de transmisiones digitales donde la información es generalmente contenida en portadoras con modulación en fase.

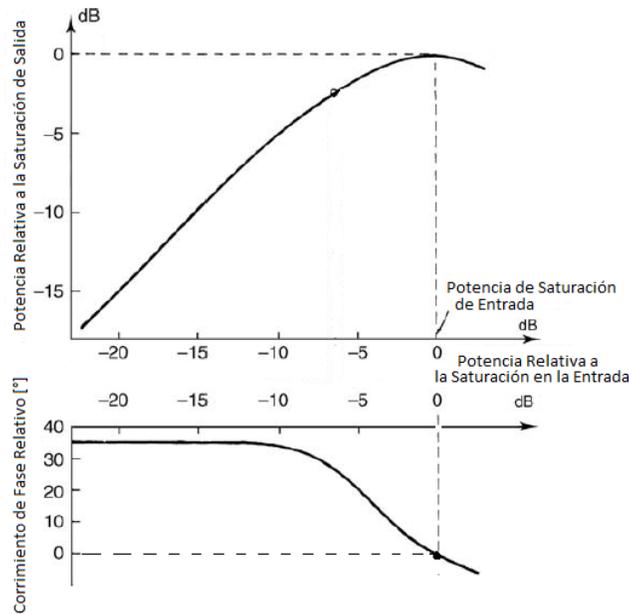


Figura 5-5: Variaciones de la fase en la salida debido a la variación de la amplitud en la entrada.

5.4.4 Señal de tipo Barrido

El desmarque de fase en el oscilador local de un modem satelital, un excitador de video, un convertidor de frecuencia o un amplificador de potencia, además de variaciones de temperatura o bien la mala calidad de los componentes electrónicos puede provocar señales de barrido. Por lo que es importante verificar con frecuencia la correcta operación del oscilador en fase.

También se puede dar el caso de múltiples barridos, esto provocado por la falla de algún equipo que se encuentra oscilando internamente en la cadena ascendente, sin embargo, a nivel satelital, solo algunos barridos se pueden observar.

5.4.5 Ruido generado en un amplificador Klystron

Este tipo de interferencia se presenta en estaciones que utilizan amplificadores de potencia de tipo Klystron de varias cavidades (Figura 5-6), operando en una cavidad incorrecta, lo que genera levantamiento del piso de ruido en los costados de la portadora.

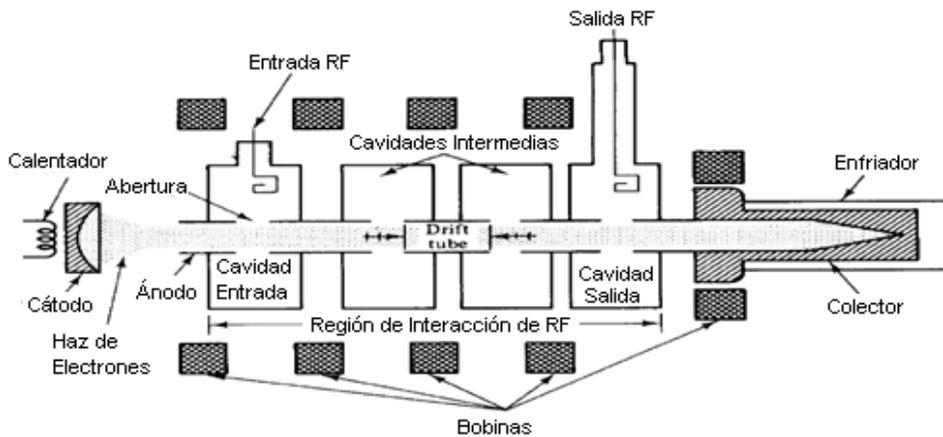


Figura 5-6: Amplificador Klystron de múltiples cavidades.

Este efecto puede llegar a confundirse con una intermodulación, sin embargo la diferencia reside en que el levantamiento del piso de ruido es asimétrico, en comparación con una intermodulación, en la que el levantamiento sería simétrico respecto a la portadora.

5.5 Interferencias Intencionales

Las interferencias intencionales son raras y por lo general muy notorias. En muchos países, sobre todo del primer mundo, el ocasionar intencionalmente una interferencia de radio frecuencia dañina se considera como crimen. Esta medida ha ayudado a disminuir los casos de este tipo.

Estos casos se deben a que la comunicación satelital, a diferencia de aquella que para su propagación utiliza medios de transmisión de ondas guiadas (cable coaxial, fibra óptica, guías de onda, etc.), utiliza el aire como la forma en que se propaga (ondas no guiadas), lo que provoca una mayor vulnerabilidad, ya que cualquier transmisor en tierra que se encuentre dentro de la zona de cobertura del satélite (huella) puede ser una fuente de interferencia, siempre y cuando esa zona cuente con suficiente PIRE. Muchos de los recursos de los centros de control satelital consisten en el monitoreo constante de todos los transpondedores en el enlace de bajada, así la interferencia puede ser observada tan pronto como aparece. Este proceso puede mejorar si se tiene una buena comunicación directa con los usuarios que tiene asignada parte de la capacidad del satélite, ya que ellos pueden detectar una interferencia en su transmisión, y ya sea por correo electrónico o mejor aún llamando al centro de control, reportan la afectación de sus servicios, con lo que la gente encargada de controlar el satélite puede analizar si la interferencia es provocada por el mismo sistema del usuario o bien si es ajeno a éste. Por lo tanto, la clave para controlar y eliminar interferencias dañinas es mantener este tipo de vigilancia en el sistema.

Las interferencias intencionales son una fuente de ansiedad para operadores y usuarios del satélite. Siempre hay la posibilidad de que un “radio-pirata” tome el control de una estación terrena o bien, construya una con el propósito de causar algún tipo de abuso. En los raros casos cuando esto pasa, el perpetrador es identificado y perseguido. Esto puede ser provocado por personas con problemas emocionales y conlleva a conflictos en donde la policía u otras autoridades tienen que intervenir. En la actualidad, no existe una fuerza policial encargada de estos casos; en el ámbito internacional, la UIT se encarga de proveer reglas para poder normalizar los sistemas tratando de evitar interferencias accidentales, pero en cuestión de las interferencias intencionales, lo único que queda es tomar medidas de prevención y protección de la información que viaja en la red satelital para prevenir futuros episodios. Para el caso de problemas de interferencias con sistemas de distintos países, la resolución debe ser llevada por un proceso diplomático entre las administraciones, cuestiones más allá de la parte técnica que se aborda en este trabajo.

5.5.1 Casos de Sabotaje

Otro tipo de interrupción intencional es de tipo “físico”, al que le llamamos sabotaje. Siendo que los satélites son controlados desde tierra, pueden llegar a suceder casos de vandalismo en estaciones terrenas. Cualquier estación terrena de alta potencia utilizada para enlaces ascendentes de TV puede ser usada para sabotear y/o tomar control de la transmisión, teniendo el apropiado equipo decodificador. Por ello las nuevas generaciones de satélites comerciales tienen como uno de sus objetivos de diseño, desarrollar sistemas de comandos de seguridad que puedan prevenir la remota posibilidad de casos de sabotaje.

La mayoría de las estaciones terrenas que son capaces de causar un sabotaje al satélite están protegidas con parámetros de seguridad. La complejidad de la seguridad física, dependerá del riesgo. Instalaciones en áreas remotas pueden tener menor seguridad, debido a su difícil acceso.

Las instalaciones de control satelital que utilizan los gobiernos como servicio de comunicación deben estar totalmente protegidas. Este es un caso especial que debe ser tratado con más cuidado que aquellos casos de tipo comercial, ya que cualquier ataque podría representar un problema de seguridad nacional.

5.6 Fuentes de interferencia que surgen en la operación del sistema o que surgen de otros sistemas de comunicación no satelitales

5.6.1 Inducción de señales

Este efecto consiste en pares de inducción de campo electromagnéticos provocados por el mal estado o la mala colocación de cables y conectores en cualquier parte de los sistemas de comunicación. En el caso de los sistemas satelitales, estas interferencias se pueden dar en la estación terrena o en la estación espacial teniendo, de acuerdo al servicio y al tipo de estación, entre los efectos de inducción que se pueden presentar se tienen:

- Inducción de señales de Radiodifusión en FM
- Inducción satelital
- Inducción de Microondas
- Inducción de Subportadoras de audio
- Inducción de audio y luminancia de la señal de TV
- Inducción de audio de VHF

5.6.2 Por espurias

Hay pequeñas espurias generadas, ya sea por los diversos subsistemas que integran al satélite o por causas desconocidas. La característica típica de una señal espuria de baja amplitud, radica en presentar un ancho de banda de no más de 50 kHz y una relación C/N de no más de 5dBc.

Las señales espurias son generalmente pequeñas y pueden no ser armónicas respecto a la fundamental, dificultando su localización. Su origen es muchas veces desconocido y es un problema que se presenta comúnmente en las transmisiones satelitales.

5.6.3 Fallas en la coordinación

Cuando se suben señales al satélite sin la autorización y supervisión de personal de monitoreo y sin la coordinación de sus áreas involucradas, así como una mala operación o desconocimiento del uso del equipo en el caso de la transmisión en frecuencias erróneas.

Este suele ser un problema común cuando se tienen transpondedores con multiportadoras, lo que provoca que varios clientes operen muy cerca uno de otro. Los parámetros de transmisión deben ser cuidadosamente configurados para evitar interferir portadoras vecinas y de transpondedores en polarizaciones cruzadas, siendo el caso de utilizar reuso de frecuencias.

5.6.4 Interferencia de Radio-Altímetros

Los radio-altímetros son equipos de navegación instalados a bordo de una aeronave o de un vehículo espacial, que permiten determinar la altura a que se encuentran estos sobre la superficie de la Tierra u otra superficie. Su funcionamiento está basado en una onda de radar que se emite hacia abajo y vuelve reflejada al instrumento, cuyo procesador mide el tiempo transcurrido y, por consiguiente, la distancia recorrida por la onda de radio. Estos operan en la banda C, en el rango de 4200 a 4400 MHz, y provocan afectaciones de manera local. Por lo que se requiere poner filtros supresores de frecuencias que no permitan pasar señales mayores a 4200 MHz.

Otra medida de prevención consiste en tener los centros de control satelital o los telepuertos en zonas lejanas a aeropuertos o evitar estar en medio de rutas de aeronaves comerciales, esto para evitar afectaciones transitorias en la comunicación de banda C.

5.6.5 Interferencia Solar

El ruido cósmico, es decir la temperatura de ruido de la antena debido a las fuentes radioeléctricas extraterrenales puede aumentar si una fuente radioeléctrica intensa cae dentro del haz principal de la antena. Las fuentes extraterrenales de ruido más importantes son el Sol y la Luna.

Al cruzar el Sol o al estar muy próximo a cruzar el eje de la antena de alta ganancia de una estación terrena impide su comunicación con el satélite, debido a que la temperatura de ruido sobrepasa rápidamente un nivel tolerable alcanzado hasta 20 000 [K] o más. Las antenas de muy baja ganancia no sufren este efecto, debido a que el Sol no les produce una temperatura de ruido suficientemente alta. Aún cuando la dirección del Sol es independiente de cualquier órbita satelital, el apuntamiento de la antena y por tanto las condiciones que provoca la interferencia depende de la posición en que se encuentre el satélite en la trayectoria de su órbita.



Figura 5-7: Caso de Interferencia Solar.

La mayor afectación sucede durante el equinoccio de primavera y después del equinoccio de otoño si la estación terrena está en el Hemisferio Norte, y después del equinoccio de primavera y antes del equinoccio de otoño si la estación está en el Hemisferio Sur.

Capítulo 6 Interferencia entre sistemas satelitales adyacentes

6.1 Posibles Modos de interferencia

Al utilizar una banda de frecuencia para un determinado servicio, es necesario asegurarse que la interferencia entre las diferentes redes que operan para ese servicio en esa banda no exceden los límites aceptables. Cuando una banda de frecuencia es compartida entre 2 o más servicios, métodos similares son usados para asegurar que estaciones de servicios secundarios no interfieran con estaciones de servicios primarios, y que la interferencia entre estaciones de servicios del mismo nivel (primario, secundario, etc.) no excedan los límites aceptables.

En el caso del servicio fijo por satélite, es importante mencionar que se considera como un servicio primario. Esto quiere decir que tiene prioridad con respecto a otros servicios que trabajan en la misma frecuencia en los enlaces, tanto de subida como de bajada.

Para poder conocer los límites permitidos de interferencias en el servicio fijo satelital, es importante saber las fuentes de interferencia. A estas fuentes se les conoce como posibles modos de interferencia entre estaciones en el espacio y estaciones de servicio terrestres.

Antes de hablar sobre los modos de interferencia, es importante mencionar la diferencia entre una estación terrena y una estación terrestre. La primera es aquella utilizada para enlaces Tierra-espacio; en cambio, la segunda es aquella utilizada en enlaces Tierra-Tierra, como las microondas terrestres.

Los modos de interferencia están divididos de la siguiente manera:

- Modos de interferencia entre servicios espaciales y terrestres

A1 Transmisión de una estación terrestre que posiblemente interfiere en la recepción de una estación terrena

A2 Transmisión de una estación terrena que posiblemente interfiere en la recepción de una estación terrestre

C1 Transmisión de una estación espacial que posiblemente interfiere en la recepción de una estación terrestre

C2 Transmisión de una estación terrestre que posiblemente interfiere en la recepción de una estación espacial

- Modos de interferencia entre estaciones de diferentes sistemas espaciales en bandas de frecuencias asignadas por separado para enlaces de subida y enlaces de bajada

B1 Transmisión de una estación espacial de un sistema que posiblemente interfiere en la recepción de una estación terrena de otro sistema espacial

B2 Transmisión de una estación terrena de un sistema espacial que posiblemente interfiere en la recepción de una estación espacial de otro sistema

- Modos de interferencia entre estaciones de diferentes sistemas espaciales con bandas de frecuencias asignadas para uso bidireccional

E Transmisión de una estación espacial de un sistema que posiblemente interfiere en la recepción de una estación espacial de otro sistema

F Transmisión de una estación terrena de un sistema espacial que posiblemente interfiere en la recepción de una estación terrena de otro sistema espacial.

El siguiente diagrama (Figura 6-1), muestra la forma en que se distribuyen los modos de interferencia para el caso de 2 sistemas satelitales adyacentes.

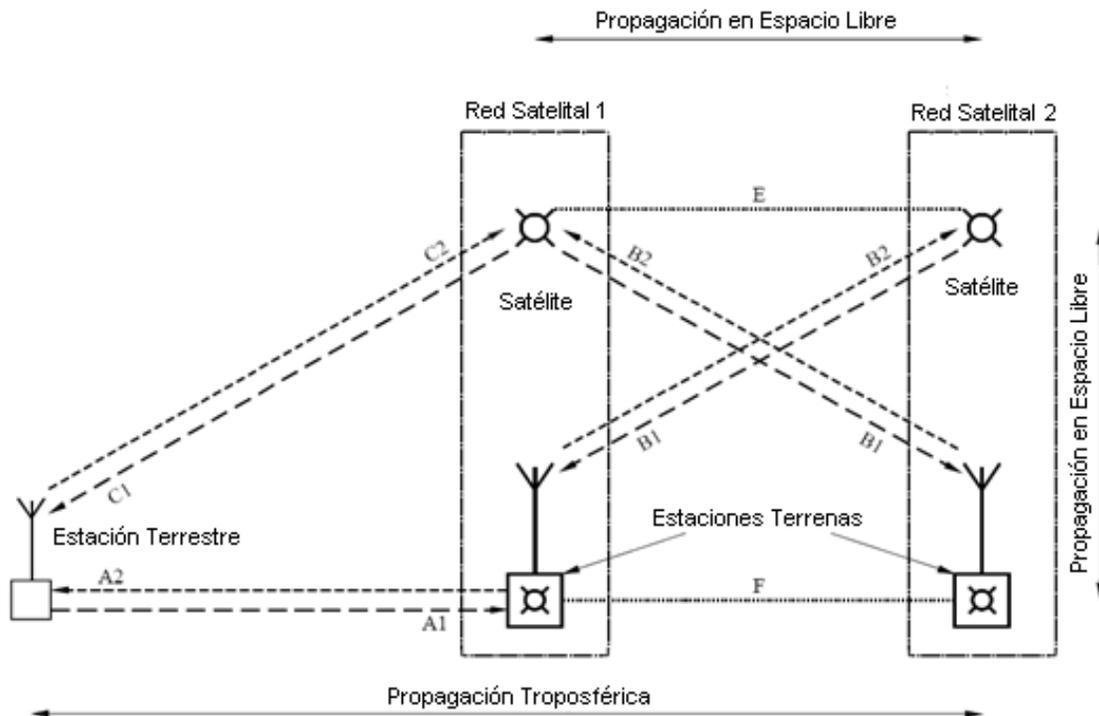


Figura 6-1: Modos de interferencia para el servicio fijo por satélite considerando dos sistemas satelitales de iguales condiciones y derechos para radiocomunicaciones terrestres.

6.2 Interferencia entre Satélites Adyacentes

Cuando la transmisión de una estación espacial de un sistema interfiere en la recepción de una estación espacial de otro sistema (Modo de Interferencia E), se debe al uso de bandas de frecuencia bidireccionales, esto es, cuando una red satelital utiliza una banda de frecuencia para transmitir y la otra red satelital utiliza la misma banda para la recepción, quedando en sentidos opuestos, por ello cuando un satélite transmite, existe la posibilidad de que un satélite adyacente reciba esa señal no deseada.

Para el cálculo de la interferencia entre satélites adyacentes, se obtiene el aumento aparente de la temperatura de ruido equivalente del enlace. Este parámetro es utilizado para la coordinación entre redes satelitales adyacentes, por lo que primero es necesario definir las dos redes siendo A un enlace por satélite de la red R asociada al satélite S, y A' un enlace por satélite de la red R' asociada al satélite S'. De acuerdo a la Figura 6-2.

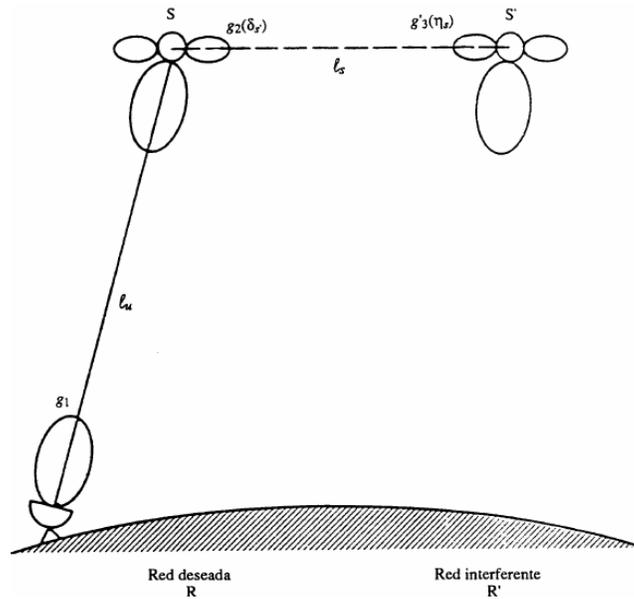


Figura 6-2: Redes deseada e interferente que comparten la misma banda de frecuencias en sentidos opuestos de la transmisión (utilización bidireccional).

Donde:

- η_s : dirección del satélite S, a partir del satélite S';
- δ_s : dirección del satélite S', a partir del satélite S;
- g_1 : Ganancia de la antena transmisora de la estación terrena e_T en dirección del satélite S;
- $g_2(\delta_s)$: ganancia de la antena transmisora del satélite S en la dirección δ_s ;
- $g_3(\eta_s)$: ganancia de la antena transmisora del satélite S' en la dirección η_s ;
- ℓ_u : pérdida de transmisión en el espacio libre correspondiente al enlace ascendente;
- ℓ_s : pérdida de transmisión en el espacio libre correspondiente al enlace entre satélites, calculada entre el satélite S y el satélite S';

El incremento de la temperatura de ruido equivalente resultante de la interferencia que se recibe en la antena del satélite del enlace A está dado por:

$$\Delta T_S = \frac{p'_S g'_3(\eta_s) g_2(\delta_s)}{k \ell_s}$$

Donde:

- k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);
- p'_S : Densidad máxima de potencia por Hz suministrada a la antena transmisora del satélite S' (media correspondiente a la banda más desfavorable de 4 kHz, cuando la frecuencia de la portadora es inferior a 15 GHz, o a la banda más desfavorable de 1 MHz, cuando la frecuencia de la portadora es superior a 15 GHz) (W/Hz);

Considerado la ganancia de transmisión, el incremento aparente de la temperatura de ruido equivalente del enlace viene dado por:

$$\Delta T = \gamma \Delta T_S$$

Por otro lado, el incremento $\Delta T'$ de la temperatura de ruido equivalente del enlace A' originado por las emisiones interferentes del satélite asociado al enlace A, está dado por:

$$\Delta T' = \gamma' \Delta T'_S = \frac{p_s g_3(\eta'_s) g'_2(\delta_s)}{k \ell'_s}$$

Si los dos enlaces A y A' únicamente comparten una banda, se producirá interferencia entre enlaces de satélites adyacentes solamente en el enlace que utilice la banda compartida para su trayecto ascendente.

Puede utilizarse la discriminación por polarización para reducir la probabilidad de interferencias entre redes de satélite, cuando se emplean polarizaciones diferentes. En este caso, el incremento aparente de la temperatura de ruido equivalente del enlace por satélite, en el caso de interferencia entre satélites, puede determinarse mediante la expresión:

$$\Delta T = \frac{\gamma \Delta T_S}{Y_{SS}}$$

Donde Y_{SS} es el factor de discriminación por polarización para el enlace entre satélites.

6.3 Interferencia generada por una estación terrena en satélites de sistemas adyacentes y de un satélite en estaciones terrenas de sistemas satelitales adyacentes.

Para los casos de estaciones terrenas interfiriendo a satélites de sistemas adyacentes (Modo B2) y de satélites que interfieren a estaciones terrenas de otro sistema satelital (Modo B1) se puede realizar un cálculo similar de la interferencia a partir del incremento de la temperatura de ruido equivalente en cada enlace. Estos tipos de interferencia, están asociados a los casos en los que se asigna una banda de frecuencia en el enlace de subida y otra banda de frecuencia en el enlace de bajada, situación que sucede en los servicios fijos y en los servicios de radiodifusión.

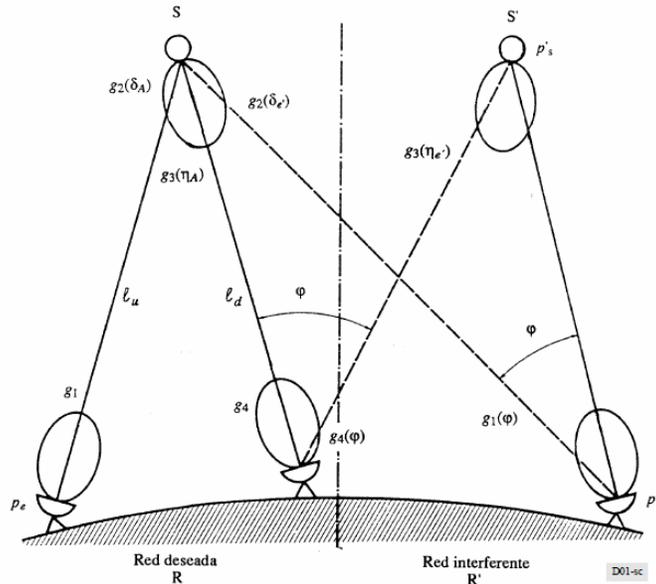


Figura 6-3: Redes que comparten la misma banda de frecuencias en el mismo sentido de transmisión.

Como se puede ver en la Figura 6-3. Para que exista una interferencia entre dos redes satelitales adyacentes, la asignación de bandas de frecuencias es la misma, tanto para el enlace de subida, como para el enlace de bajada.

Para el cálculo de la interferencia usando como parámetro el incremento de ruido aparente, se utilizan las mismas expresiones que en el caso de interferencia entre satélites. La diferencia consta de que, en estos casos, la ruta de la transmisión consta de 2 partes.

La primera, desde la antena transmisora de la estación terrena que interfiere al satélite S, está dada por:

$$\Delta T_S = \frac{p'_S g'_1(\varphi_t) g_2(\delta'_e)}{k \ell_u}$$

Donde:

ℓ_u : Pérdida de transmisión en el espacio libre correspondiente al enlace ascendente, calculada entre la estación terrena transmisora y el satélite S para el enlace por satélite A;

Y la segunda, desde el satélite S' que interfiere en la antena receptora de una estación terrena de una red satelital adyacente, está dada por:

$$\Delta T_e = \frac{p'_S g'_3(\eta_e) g_4(\varphi_t)}{k \ell_d}$$

El incremento de la temperatura de ruido equivalente del enlace (la suma de los dos modos de interferencia) por satélite resulta de la interferencia que se recibe tanto en el receptor del satélite como en el de la estación terrena del enlace A.

Cuando los satélites S y S' están equipados con simples repetidores-convertidores de frecuencia que utilizan la misma frecuencia de translación, las interferencias que se reciben en el enlace A se originan en los enlaces ascendente y descendente por el mismo enlace A'.

Por consiguiente, puede expresarse como sigue:

$$\Delta T = \gamma \Delta T_S + \Delta T_e$$

Donde La ganancia de transmisión se expresa como sigue:

$$\gamma = \frac{p_S g_3(\eta_A) g_4 \ell_u}{p_e g_1 g_2(\delta_A) \ell_d}$$

Siendo g_1 y g_4 son las ganancias máximas (en el eje) de las antenas de las estaciones terrenas de recepción y transmisión respectivamente.

Para determinar el mayor valor de $\Delta T/T$ es necesario asegurar que se han incluido todos los casos de posible interferencia. La mayor interferencia entre redes de satélite puede ser la del enlace ascendente o la del enlace descendente por lo que deberá poderse disponer de datos suficientes para calcular ambos casos con respecto a cada zona de servicio espacio-Tierra, esta razón está dada por:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\gamma \Delta T_S}{T} + \frac{\Delta T_e}{T}$$

Si el valor calculado de $\Delta T/T$ es inferior o igual al preestablecido, generalmente se considera del 6% con reutilización de frecuencias, y 6.5% sin reutilización de frecuencias, el nivel de interferencia causado por el enlace del satélite A' en el enlace del satélite A será admisible, independientemente

te de las características de modulación de ambos enlaces por satélite y de las frecuencias específicas utilizadas.

En cambio, si el valor calculado de $\Delta T/T$ es superior al preestablecido, habrá que efectuar un cálculo más detallado aplicando otros métodos y técnicas.

Para aplicar estos conceptos, es necesario conocer los ámbitos de interferencia. Para ello, se debe identificar cada banda o segmento de banda común a ambas redes, para cada haz de satélite en los dos segmentos espaciales. Dentro de cada una de tales bandas o segmentos de bandas, se identifican aquellas porciones en las que permanecen constantes las sensibilidades de recepción (G/T) de la estación espacial y de la estación terrena y las densidades de PIRE de la estación espacial y de la estación terrena, en cualquiera de las redes.

Ciertas partes del espectro pueden aparecer varias veces, debido a la reutilización de las frecuencias dentro de la red satelital. Cuando las frecuencias de los enlaces de subida y de bajada, o los haces del satélite, o ambos pueden agruparse por pares de varias formas (conmutación de la conectividad de los haces en un satélite), deben considerarse todas las posibles configuraciones operacionales. Además, el número de ámbitos estará limitado normalmente, al menos pueden, en los satélites convencionales, por la disposición de transpondedor de éstos y pueden, en los satélites simples, albergar varios o todos los transpondedores. Cuando dos satélites tienen haces de antena únicos (esto es, coincidencia en la cobertura de los haces transmisor y receptor) y todos sus transpondedores tienen características uniformes sobre la banda de frecuencias comunes, habrá únicamente un ámbito de interferencia.

Las características de las redes afectadas y la posible gravedad de la interferencia influyen en la elección del método a utilizar para la coordinación. Para ello, se tiene las siguientes técnicas:

- La comparación de las características de la *potencia total de la portadora* de las transmisiones con criterios de potencia interferente recibida admisible;
- La comparación de las características de *densidad de potencia* de las transmisiones con criterios de *densidad de potencia* interferente recibida admisible;
- La comparación de *aislamiento* disponible entre redes (pérdida de acoplamiento normalizada entre redes) con criterios de *aislamiento* necesario entre transmisiones (relación normalizada «portadora deseada/portadora interferente»).

La técnica de la potencia de la portadora es principalmente aplicable a los casos:

- En bandas de frecuencias en las que las redes de satélite están bien desarrolladas y en las que la población (número de satélites) es relativamente elevada;
- Para modulaciones que están bien definidas y pueden ser de cualquier tipo: de un solo canal por portadora (SCPC), analógicas, digitales, TV-MF, etc.;
- En bandas de frecuencias en las que este método se ha utilizado ampliamente.

La técnica de la densidad de potencia es principalmente aplicable a los casos:

- En bandas de frecuencia en las que las redes de satélite están en las etapas iniciales de desarrollo y en las que la población de satélites es reducida;

-
- Para modulaciones que tienen una densidad espectral de potencia casi uniforme; por ejemplo, modulaciones digitales;
 - Cuando los cálculos iniciales de $\Delta T/T$ presentan valores que son aceptables para cada red satelital; éste puede ser el caso de algunos dominios comunes entre las redes;
 - Cuando hay un grado considerable de flexibilidad en una o en ambas redes, de modo que puedan modificarse los valores de la densidad de potencia.

Para el caso de las técnicas de aislamiento, se tienen dos métodos: aislamiento convencional y aislamiento del enlace.

En el método de *aislamiento convencional* se compara el aislamiento disponible entre redes (una medida del acoplamiento electromagnético entre dos redes) con el aislamiento necesario entre dos transmisiones mutuamente interferentes.

El aislamiento necesario es una medida relativamente precisa de la «incompatibilidad» por interferencia de dos transmisiones; cuanto más alto es el valor de aislamiento necesario, mayor es la incompatibilidad. Se expresa a través de la relación potencia deseada/potencia interferente admisible entre dos transmisiones y sus respectivos requisitos de calidad

En este método se compara también el aislamiento disponible en el enlace con el aislamiento necesario de la portadora para determinar la necesidad de coordinación. Cuando el valor del aislamiento disponible del enlace es menor que el aislamiento necesario de la portadora, es necesario establecer una coordinación detallada.

Según este enfoque, se determina el aislamiento disponible en el enlace basándose en la información relativa al “back-off” (reducción respecto a saturación) de entrada y de salida del transpondedor, la PIRE del satélite y la densidad de flujo de saturación, junto a los parámetros principales de diseño del enlace. No es necesario acudir al detalle de los parámetros de la portadora como en el método del aislamiento convencional.

Los aislamientos necesarios de la portadora se expresan en términos de relaciones de potencia señal deseada/no deseada para el caso de interferencia de una sola fuente entre dos transmisiones, y de sus respectivas relaciones de portadora/densidad de ruido en el enlace descendente.

6.4 Interferencia generada por estaciones terrestres en estaciones terrenas

La congestión del espectro radioeléctrico ha determinado la necesidad de compartir muchas bandas de frecuencias de microondas entre diferentes servicios radioeléctricos y entidades de explotación similares.

Como ejemplo se tiene a la banda C asignada para comunicaciones satelitales la cual, es también asignada a enlaces de microondas terrestres. Estos enlaces se han ido desarrollando como vastas y complejas redes que abarcan una gran superficie en Tierra, sobretodo en áreas muy pobladas, por lo que existe un congestionamiento de enlaces terrestres que provoca dificultades para localizar una estación terrena. Debido a que ésta estación recibe en la banda de 4 GHz, es susceptible a interferencias de microondas terrestres que transmiten a 4 GHz Además, la estación terrena transmite a 6 GHz y esto genera interferencia en la recepción de microondas terrestres que opera a 6 GHz

Para garantizar la coexistencia satisfactoria de los sistemas terrenales y Tierra-espacio existentes, es importante estar en condiciones de predecir con una precisión razonable la interferencia potencial que pueda existir entre ellos, utilizando procedimientos y modelos de predicción aceptables a todas las partes implicadas, y de precisión y fiabilidad demostradas.

La interferencia mutua entre una estación terrena y un sistema de microondas terrestre es una función de la potencia y la densidad espectral de la portadora, y la desviación de frecuencias entre dos portadoras. La potencia de la interferencia dentro de un ancho de banda de una señal satelital recibida por la estación terrena depende de la densidad espectral de una portadora interferente terrestre. En el caso de portadoras de banda ancha, frecuencias en las cuales se incluye a las señales interferentes, se tiene toda la potencia de la portadora interferente. Pero para el caso de portadoras satelitales de banda estrecha, la potencia de la portadora interferente se reduce por medio de un factor reductor de interferencia que es la relación entre la potencia total de la portadora y la potencia en la banda estrecha.

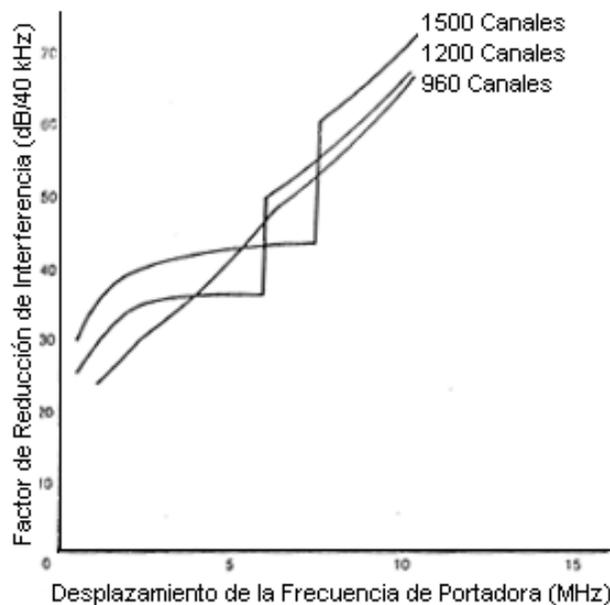


Figura 6-4: Factor de reducción de interferencia para una portadora satelital.

De forma similar, la desviación de frecuencias provoca interferencias en los sistemas de microondas terrestres provocadas por transmisiones en banda estrecha desde estaciones terrenas. La magnitud de la interferencia se determina con la separación entre la frecuencia de la portadora interferente y la frecuencia de la portadora terrestre. El factor de reducción de interferencia se obtiene convolucionando la densidad espectral de la portadora interferente con la portadora terrestre.

La FCC establece, como objetivo, una potencia de interferencia desde portadoras de microondas terrestres de 25 dB debajo de la potencia de las portadoras satelitales.

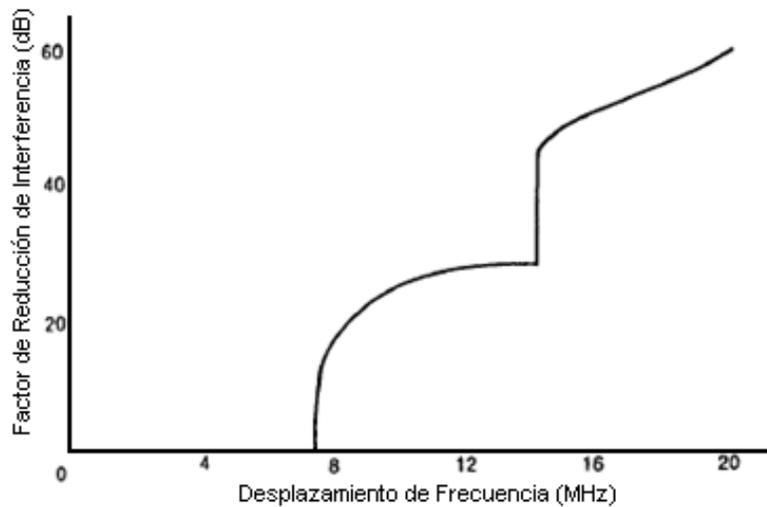


Figura 6-5: Factor de reducción de interferencia para una portadora de microondas terrestre.

6.4.1 Mecanismos de propagación de la interferencia

La propagación de la interferencia puede presentarse mediante diversos mecanismos y el predominio de cualquiera de ellos depende de factores tales como el clima, el porcentaje de tiempo en cuestión, la distancia y la topografía del trayecto. A continuación se presentan los mecanismos de propagación de interferencia más significativos, los cuales pueden llegar a presentarse de forma separada o simultánea en un trayecto.

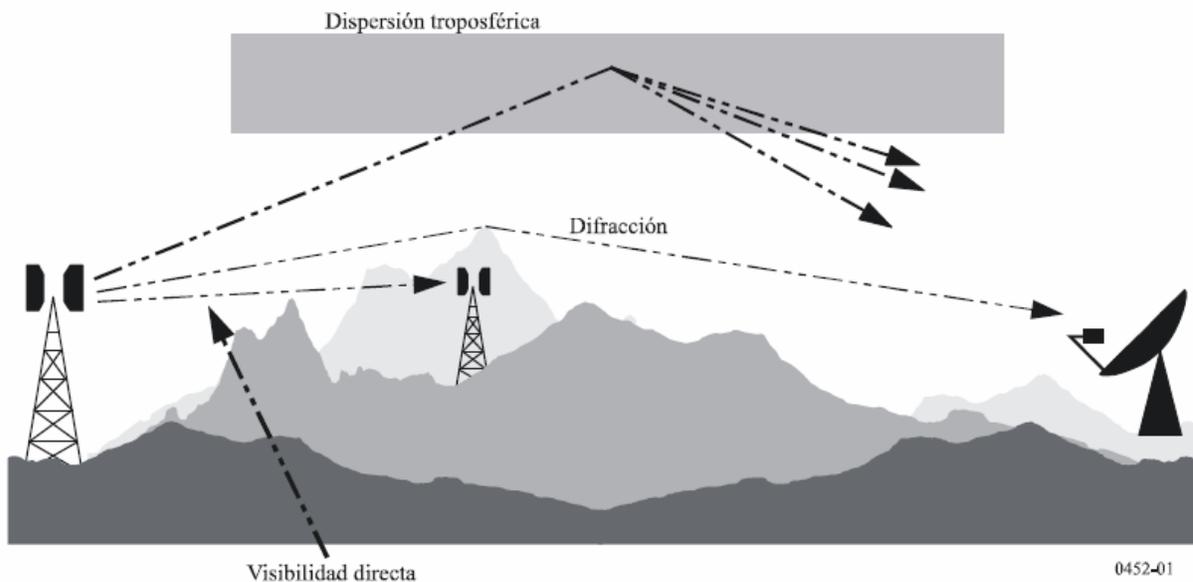


Figura 6-6: Mecanismos permanentes de propagación de la interferencia.

- Visibilidad directa (Line of Sight): Cuando existe una visibilidad mutua, se da el mecanismo de propagación de interferencia más directo, ésta se da en condiciones atmosféricas de equilibrio. Sin embargo, hay diversas condiciones que pueden aumentar el nivel de la señal, como los efectos de propagación multitrayecto y de enfoque, considerando trayectos mayores de unos 5 km.

- Difracción: Los efectos de difracción suelen ser dominantes cuando aparecen niveles significativos de la señal. Para los servicios en los que los problemas de anomalías de corta duración no son importantes, la exactitud del modelo de difracción determina a menudo la densidad de los sistemas que pueden implementarse. La capacidad de predicción de la difracción debe ser tal que permita incluir las situaciones de terreno liso, de obstáculos discretos y de terreno irregular.
- Dispersión troposférica: Este mecanismo define el nivel de interferencia de fondo para trayectos más largos, entre 100 y 150 km, en los que el campo de difracción se hace muy débil. Sin embargo, generalmente la interferencia a través de este mecanismo suele tener un nivel demasiado reducido como para ser considerada significativa.
- Propagación por conductos de superficie: Éste es el mecanismo de interferencia de corta duración más importante sobre el agua y en zonas de tierra costeras planas, y puede dar lugar a niveles de señal elevados en distancias largas de más de 500 km sobre el mar. Dichas señales pueden exceder el nivel equivalente de “espacio libre” en determinadas condiciones.
- Reflexión y refracción en capas elevadas: Estos mecanismos pueden tener repercusiones significativas en distancias bastante largas, aproximadamente de entre 250 a 300 km. Su tratamiento en capas de alturas de hasta algunos cientos de metros reviste gran importancia, ya que pueden hacer que las señales superen las pérdidas de difracción del terreno en situaciones favorables de geometría del trayecto.
- Dispersión por hidrometeoros: Éste mecanismo puede ser una fuente potencia de interferencia entre transmisores de enlaces terrenales y estaciones terrenas porque puede actuar prácticamente de forma omnidireccional y, por tanto, puede tener una repercusión más allá del trayecto de interferencia del círculo máximo. No obstante, los niveles de señal de interferencia son bastante reducidos y no suelen representar un problema significativo.

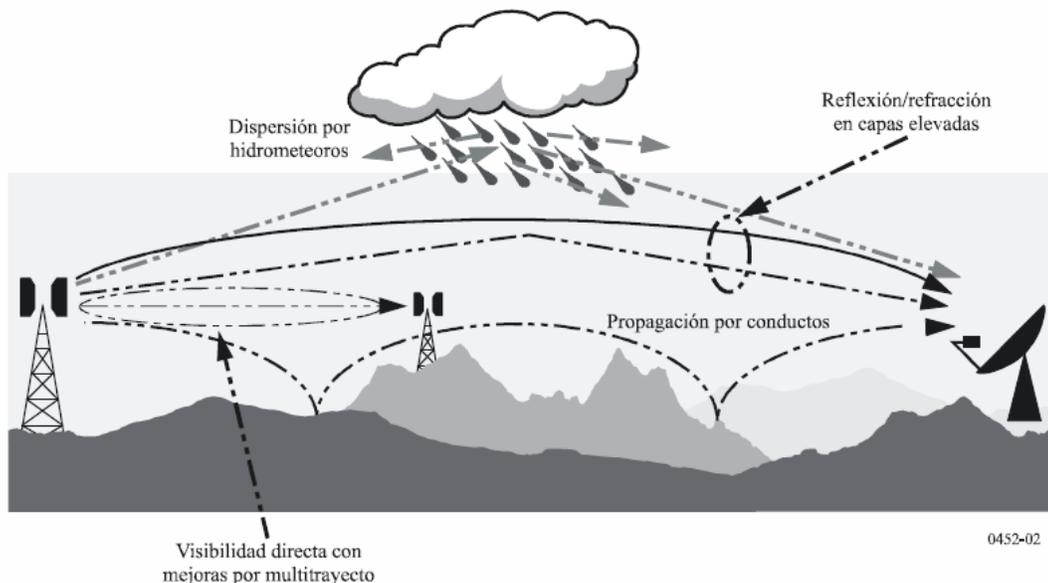


Figura 6-7: Mecanismos de propagación anómala de la interferencia (corta duración).

Un problema fundamental en la predicción de la interferencia es la dificultad de establecer un conjunto coherente y unificado de métodos prácticos que abarquen una amplia gama de distancias y porcentajes de tiempo, es decir; para la atmósfera real en la que un mecanismo que predomina se mezcla gradualmente con otro a medida que cambian las condiciones meteorológicas y/o del trayecto. Especialmente en estas regiones de transición, puede producirse un nivel determina-

do de señal durante un porcentaje del tiempo total que se deba a la suma de los distintos mecanismos. El enfoque aplicado en este procedimiento ha consistido en definir métodos totalmente distintos para la predicción de la interferencia debida a la dispersión por hidrometeoros y en cielo despejado.

6.4.2 Método de predicción de interferencia en cielo despejado

El método correspondiente al cielo despejado consiste en usar modelos distintos para la difracción, la reflexión en capas/ por conductos, y la dispersión troposférica. Los tres modelos se aplican en cada caso, independientemente de que el trayecto sea con visibilidad directa o transhorizonte. Luego se combinan los resultados en una predicción global utilizando una técnica de fusión que asegura para cualquier distancia de trayecto y porcentaje de tiempo dados que la amplificación de la señal en el modelo de línea de visibilidad directa teórico equivalente es la más alta que se puede alcanzar.

Antes de realizar la predicción, se requieren algunos datos, a continuación se mencionan los más importantes:

- Frecuencia de operación dada en GHz
- Radio efectivo de la Tierra para el trayecto.
- Latitud y longitud de la estación interferente y la estación interferida
- Altura del centro de la antena sobre el nivel del suelo y sobre el nivel medio del mar para las dos estaciones
- Ganancia de la antena en la dirección del horizonte para cada estación.
- Porcentaje de tiempo requerido durante el cual no se rebasa la pérdida básica de transmisión

Teniendo estos datos, se requiere seleccionar una predicción de año medio o de mes más desfavorable, de acuerdo a la calidad total del sistema radioeléctrico interferido en el extremo receptor del trayecto de interferencia.

Ahora se requiere tener a la mano tres parámetros radiometeorológicos para describir la variabilidad de las condiciones de propagación de fondo y anómala en los diferentes lugares del mundo:

- La proporción de variación del índice medio de refracción radioeléctrica a lo largo del primer kilómetro de la atmósfera (ΔN), con unidades [N/km].
- El porcentaje de tiempo en el que pueden esperarse, en los primeros 100 m de una atmósfera baja, sobretasas de la variación de la refracción superiores a 100 unidades N/km en la atmósfera inferior (β_0)
- Refractividad de la superficie a nivel del mar (N_0), con unidades [N].

Para ΔN y N_0 , existen ciertos mapas que muestran los datos radiometeorológicos para proporcionar la variación básica de las predicciones respecto a la localización, un ejemplo de estos se tiene en el Apéndice 1 al Anexo 1 de la Recomendación de la UIT-R P.452-14.

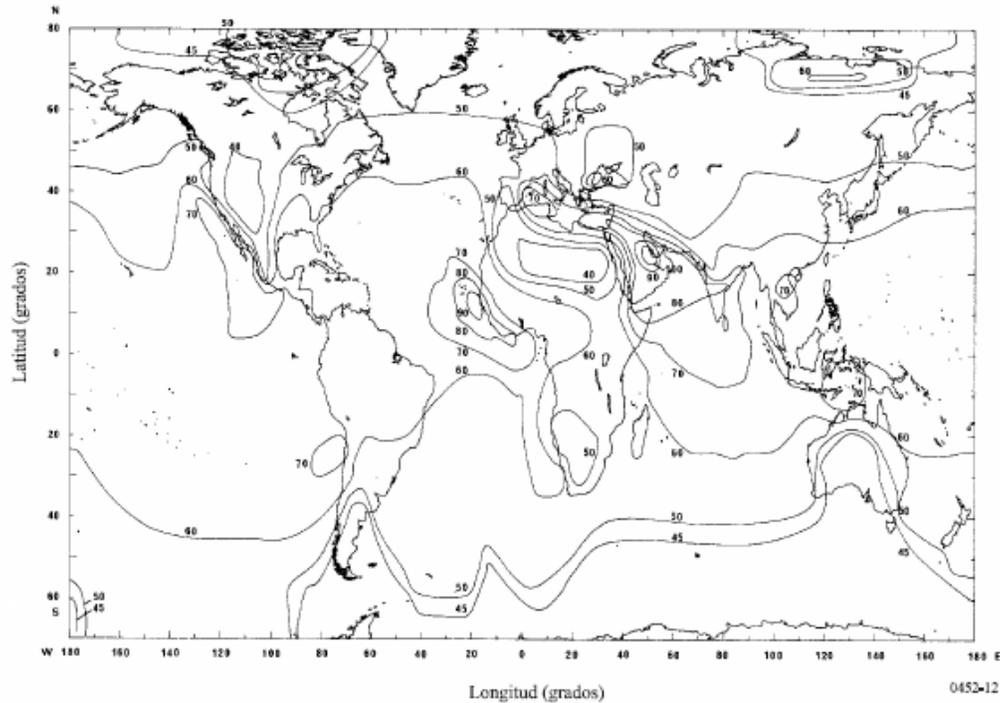


Figura 6-8: Valores máximos de media anual de ΔN (para la predicción del mes más desfavorable).

Otra cuestión a considerar es la necesidad de definir las zonas radioclimáticas, que se dividen en tres tipos:

- Tierra costera (A1): Zonas costeras y del litoral, es decir la tierra adyacente al mar hasta una altitud de 100 m con respecto al nivel medio del mar o del agua pero hasta una distancia de 50 km desde la zona marítima más próxima. Las grandes zonas interiores superiores a 7800 km² que comprendan más del 50% de agua y al mismo tiempo más del 90% de la tierra no alcanza la altitud descrita pertenecerán a la Zona A1.
- Tierra interior (A2): Tierra, a excepción de las zonas costeras y del litoral definidas como "tierra costera"
- Mar (B): Mares, océanos y otras grandes masas de agua (cuya cobertura equivalga a un círculo de al menos 100 km de diámetro). Dentro de esta Zona B, se consideran a las grandes masas de agua interiores, que son superficies de al menos 7800 km², excluyendo la superficie de ríos. Considerando a las islas con elevaciones inferiores a 100 m sobre el nivel medio del mar en más del 90% de su superficie.

Por último, antes de realizar la predicción, se requiere un análisis del perfil del trayecto relativo a las elevaciones del terreno situadas por encima del nivel del mar. Estas elevaciones se obtienen a partir de las coordenadas geográficas de las estaciones interferente e interferida a lo largo del trayecto de círculo máximo a partir de una base de datos topográfica de los correspondientes mapas de contorno a gran escala. La distancia entre puntos del perfil debería reflejar en la medida de lo posible las características más importantes del terreno. El perfil debería incluir como puntos de partida y de llegada las elevaciones del terreno en los emplazamientos de las estaciones interferente e interferida.

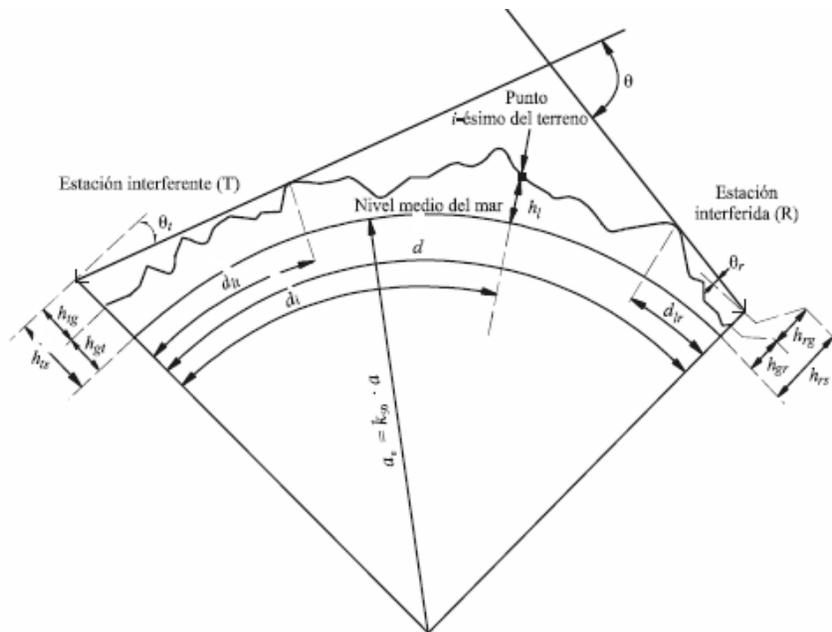


Figura 6-9: Ejemplo de un perfil de trayecto transhorizonte.

Para realizar la predicción se obtiene la pérdida de transmisión básica, L_b [dB], no rebasada durante el porcentaje de tiempo anual requerido, p , evaluada en cada modelo de propagación.

6.4.3 Modelos de predicción para la propagación en cielo despejado

- Propagación con visibilidad directa (incluyendo efectos a corto plazo): Evalúa, tanto para trayectos con visibilidad directa como transhorizonte, la pérdida de transmisión básica debida a la propagación en el espacio libre y la atenuación por gases atmosféricos.
- Difracción: La variabilidad temporal del exceso de pérdidas debidas al mecanismo de difracción se supone que es el resultado de cambios en el índice de variación global de la refractividad radioeléctrica atmosférica. Este proceso se considera válido para $\beta_0 \leq p \leq 50\%$.

Para el cálculo de la pérdida de difracción se utiliza un método híbrido, basado en la construcción Deygout y una corrección empírica, que permite hacer una estimación para todos los tipos de trayecto, con inclusión de trayectos sobre el mar o sobre superficies interiores o litorales costeros, e independientemente del hecho de que la superficie sea plana o accidentada.

- Dispersión troposférica: Para porcentajes de tiempo muy inferiores al 50%, es difícil separar el modo real de dispersión troposférica de otros fenómenos de propagación secundaria que pueden dar lugar a efectos similares de propagación, por ello es conveniente enlazarlo con el modelo explicado a continuación.
- Propagación por conductos y por reflexión en las capas: Evalúa las pérdidas básicas de transmisión que se producen durante periodos de propagación anómala.
- Pérdidas adicionales debidas a la ocupación del suelo y el modelo de altura-ganancia: En términos de protección contra la interferencia, puede obtenerse una ventaja considerable de las pérdidas de difracción adicionales que pueden insertarse en antenas localizadas en zonas

con cierto grado de ocupación del suelo (edificios, vegetación, etc.). Este procedimiento permite añadir dichas pérdidas debidas a la ocupación del suelo en uno o ambos extremos del trayecto, en aquellas situaciones en que se conocen las características de ocupación del suelo. Éste predice una pérdida adicional máxima en cada uno de los extremos del trayecto, aplicada mediante una función de interpolación con forma de S destinada a evitar una sobreestimación de la pérdida por apantallamiento. La pérdida adicional máxima es de 20 dB por encima de 0.9 GHz, que disminuye paulatinamente a frecuencias inferiores hasta 5 dB a 0.1 GHz. Cuando hay dudas en cuanto a la naturaleza de la ocupación del suelo, no deben incluirse estas pérdidas adicionales. Si se utiliza la corrección, no cabe esperar grandes pérdidas por ocupación de suelo en las zonas urbanas de edificios muy altos que están separados por espacios abiertos. En tales zonas suelen observarse menores pérdidas de éste tipo que en los centros urbanos más tradicionales formados por bloques de edificios más bajos pero más juntos.

La protección adicional disponible depende de la altura y, por tanto, su modelo es una función de altura-ganancia normalizada respecto a la altura nominal de la ocupación del suelo.

Una vez que se tiene la pérdida de transmisión básica entre las dos estaciones. A fin de calcular el nivel de señal en una estación debido a la interferencia de la otra es necesario conocer la pérdida de transmisión, que tiene en cuenta las ganancias de antena de las dos estaciones situadas en la dirección del trayecto radioeléctrico, es decir, la interferencia entre ambas.

La pérdida en la transmisión resultante, L , se obtiene con la fórmula:

$$L = L_b(p) - G_t - G_r$$

Donde:

$L_b(p)$ = pérdida de transmisión básica obtenida de los modelos de predicción para la propagación en cielo despejado.

G_t, G_r = Las ganancias de las dos estaciones

6.4.4 Predicción de la interferencia por dispersión debida a los hidrometeoros

Este método expresa directamente las pérdidas de transmisión entre dos estaciones, ya que exige conocer los diagramas de radiación de las antenas interferente e interferida para cada estación.

El método es bastante general puesto que puede utilizarse con cualquier diagrama de radiación de antena que proporcione un método de determinación de la ganancia de antena para cualquier ángulo con respecto al eje de puntería de la misma. A su vez, no está restringido a ninguna geometría en particular, siempre que se disponga de los diagramas de radiación de antena con una cobertura de $\pm 180^\circ$. Por consiguiente, incluye los acoplamientos haz principal a haz principal y lóbulo lateral a haz principal, y las geometrías de dispersión de círculo máximo y dispersión lateral. El método puede calcular los niveles de interferencia para geometrías de trayectos largos (> 100 km) y de trayectos cortos (hasta unos pocos kilómetros) con ángulos de elevación y acimutales arbitrarios en cualquiera de las estaciones. Por lo tanto, la metodología es adecuada para un amplio caso de hipótesis y servicios, incluida la determinación de la interferencia por dispersión debida a la lluvia entre dos estaciones terrenales, entre una estación terrenal y una estación terrena y entre dos estaciones terrenales que funcionen en bandas de frecuencias atribuidas bidireccionalmente.

La metodología se basa en la aplicación de la ecuación de radar biestático, que relaciona la potencia P_r que llega a una estación receptora procedente de la dispersión debida a la lluvia con la potencia P_t transmitida por una estación transmisora:

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \iiint_{\text{todo el espacio}} \frac{G_t G_r \eta A}{r_t^2 r_r^2} dV \quad [W]$$

Donde: λ : longitud de onda

G_t : ganancia (lineal) de la antena transmisora

G_r : ganancia (lineal) de la antena receptora

η : sección transversal de dispersión por unidad de volumen ∂V (m^2/m^3)

A : atenuación a lo largo del trayecto del transmisor al receptor (lineal)

r_t : distancia del transmisor al elemento de volumen de dispersión

r_r : distancia del elemento de volumen de dispersión al receptor

Expresada en términos de pérdidas de transmisión (dB), para la dispersión entre dos estaciones, Estación 1 y Estación 2, por lo que la ecuación queda como:

$$L = 208 - 20 \log f - 10 \log Z_R - 10 \log C + 10 \log S + A_g - M$$

Donde: f : frecuencia (GHz)

Z_R : reflectividad del radar a nivel de suelo, que puede expresarse en términos de la intensidad de lluvia R (mm/h):

$$Z_R = 400 R^{1.4}$$

$10 \log S$: factor de corrección (dB), que tiene en cuenta la desviación con respecto a la dispersión de Rayleigh en frecuencias superiores a 10 GHz.

A_g : atenuación debida a los gases atmosféricos a lo largo del trayecto del transmisor al receptor (dB).

M : cualquier desadaptación de la polarización entre los sistemas de transmisión y recepción (dB)

En este caso, la dispersión está confinada a la que se produce en el interior de una célula de lluvia, que se define como una sección transversal circular con un diámetro que depende de la intensidad de lluvia:

$$d_c = 3.3R^{-0.08}$$

Dentro de la célula de lluvia, la intensidad de lluvia, y por consiguiente la reflectividad del radar, se supone constante hasta la altura de la lluvia, h_R . Por encima de dicha altura, se supone que la reflectividad disminuye linealmente con la altura a un ritmo de -6.5dB/km.

La función de transferencia de la dispersión C , es la integral de volumen a lo largo de la célula de lluvia y puede expresarse, coordenadas cilíndricas, de la forma siguiente:

$$C = \int_0^{h_{\max}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_1^2 r_2^2} A \zeta \cdot r dr d\phi dh$$

Donde: G_1 : ganancia (lineal) de la Estación 1

G_2 : ganancia (lineal) de la Estación 2

r_1 : distancia desde el elemento de integración ∂V a la Estación 1

r_2 : distancia desde el elemento de integración ∂V a la Estación 2

A: atenuación debida a la lluvia, tanto dentro como fuera de la célula de lluvia.

ζ : dependencia con la altura de la reflectividad del radar:

$$\zeta = \begin{cases} 1 & \text{para } h \leq h_R \\ 10^{-0.65(h-h_R)} & \text{para } h > h_R \end{cases}$$

h_R : altura de la lluvia (km)

r, φ, h : variables de integración dentro de la célula de lluvia.

La integración se realiza numéricamente, en coordenadas cilíndricas. Sin embargo, es conveniente considerar inicialmente la geometría de la dispersión desde la estación transmisora a través de una célula de lluvia hasta la estación receptora, en términos de un sistema de coordenadas Cartesiano tomando como origen a la Estación 1, ya que la posición real de la célula de lluvia no vendrá definida inmediatamente, especialmente en el caso de dispersión lateral.

En la referencia de coordenadas Cartesianas es conveniente, para mayor sencillez, convertir en primer lugar los diversos parámetros geométricos de sus valores reales referidos a una Tierra curva a los valores que se obtendrían en una representación plana de la Tierra.

La existencia de un acoplamiento de haz principal a haz principal entre las antenas se establece a partir de la geometría y la célula de lluvia se sitúa en el punto de intersección entre los ejes del haz principal. Si no existe acoplamiento de haz principal a haz principal, la célula de lluvia se sitúa a lo largo del eje del haz principal de la Estación 1, centrada en el punto más próximo al eje del haz principal de la Estación 2. En este caso, las pérdidas de transmisión deben determinarse para un segundo caso intercambiando los parámetros de cada estación y tomando como representante las pérdidas de caso más desfavorable de los niveles de interferencia probables.

6.5 Interferencia entre estaciones terrenas

6.5.1 Ganancia de antena hacia el horizonte para una estación terrena

El componente de ganancia de antena de la estación terrena en la dirección del horizonte físico alrededor de una estación terrena es una función de la separación angular entre el eje del haz principal de la antena y el horizonte en la dirección considerada. Cuando la estación terrena se utiliza para transmitir a una estación espacial en una órbita ligeramente inclinada, hay que considerar todas las posibles direcciones de puntería del eje del haz principal de la antena. Para la coordinación de estaciones terrenas, se requiere para cada acimut conocer $\phi(\alpha)$, el valor posible mínimo de la separación angular que se producirá durante el funcionamiento del satélite.

Cuando una estación espacial geoestacionaria mantiene su ubicación próxima a su posición orbital nominal, el ángulo de elevación del eje del haz principal de la estación terrena, ϵ_s , y el ángulo acimutal, α_s , hasta el satélite desde la latitud de la estación terrena, ζ , están relacionados de manera unívoca.

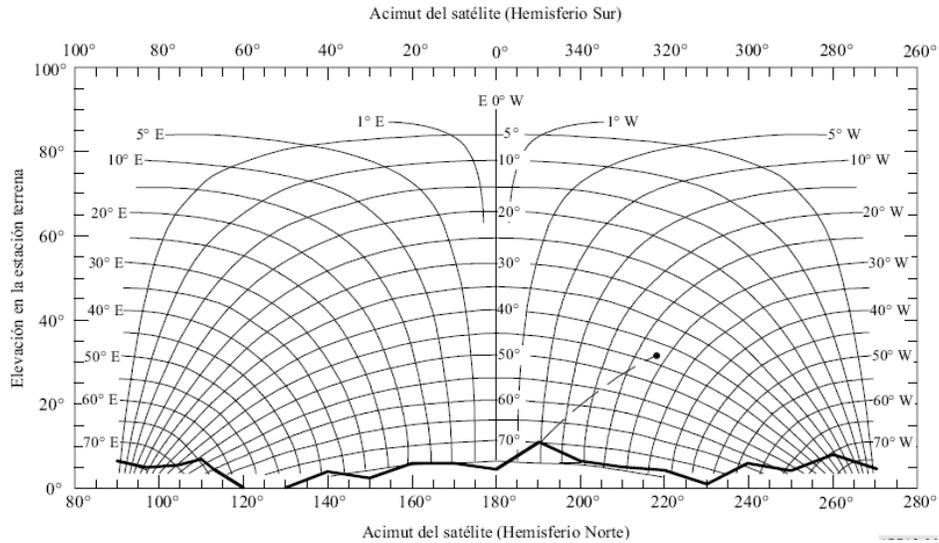


Figura 6-10: Arcos de posición de satélites geostacionarios con el horizonte y el arco desde el horizonte en el acimut de 190° hacia un satélite situado a 28°W de una estación terrena en la latitud 43°N.

Cuando se relaja el mantenimiento en posición norte/sur de un satélite geostacionario, la órbita del satélite se inclina, con una inclinación que aumenta gradualmente en función del tiempo. Vista desde la Tierra, la posición del satélite traza una figura de ocho durante cada periodo de 24 h.

La relación $\phi(\alpha)$ se utiliza para derivar una función para la ganancia de la antena (dBi), $G(\phi)$, hacia el horizonte, en función del acimut α , utilizando el diagrama de radiación de antena real de la estación terrena, o una fórmula que dé una buena aproximación. Por ejemplo, cuando la relación entre el diámetro de la antena y la longitud de onda es igual o mayor que 35, se utiliza la siguiente ecuación:

$$G(\phi) = \begin{cases} G_{am\acute{a}x} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \phi \right)^2 & \text{para } 0 < \phi < \phi_m \\ G_1 & \text{para } \phi_m \leq \phi < \phi_r \\ 29 - 25 \log \phi & \text{para } \phi_r \leq \phi < 36^\circ \\ -10 & \text{para } 36^\circ \leq \phi \leq 180^\circ \end{cases}$$

$$G_1 = \begin{cases} -1 + 15 \log (D/\lambda) & \text{dBi} & \text{para } D/\lambda \geq 100 \\ -21 + 25 \log (D/\lambda) & \text{dBi} & \text{para } 35 \leq D/\lambda < 100 \end{cases}$$

$$\phi_m = \frac{20 \lambda}{D} \sqrt{G_{am\acute{a}x} - G_1} \quad \text{grados}$$

$$\phi_r = \begin{cases} 15,85 (D/\lambda)^{-0,6} & \text{grados} & \text{para } D/\lambda \geq 100 \\ 100 (\lambda/D) & \text{grados} & \text{para } 35 \leq D/\lambda < 100 \end{cases}$$

Cuando se dispone de una representación mejor del diagrama real de la antena, éste puede ser utilizado.

Además de las interferencias provocadas por una estación terrena en satélites de redes adyacentes, se puede dar el caso de que, debido a una mala coordinación de las estaciones terrenas, se den casos de interferencia entre ellas (modo de interferencia).

Para evitar esto, es importante que en la zona que rodea a una estación terrena, al compartir la misma banda de frecuencias atribuida bidireccionalmente con otras estaciones terrenas, se tengan niveles de interferencia admisibles, a esta área se le conoce como zona de coordinación.

La determinación de ésta zona se basa en el concepto de la potencia interferida admisible en las terminales de la antena de una estación terrena receptora. Por consiguiente, la atenuación requerida para limitar el nivel de interferencia entre dos estaciones terrenas a la potencia de interferencia admisible durante p% del tiempo se representa mediante la “atenuación requerida mínima”, que es la atenuación que tiene que ser igualada o rebasada por la pérdida prevista en el trayecto durante todo el tiempo, salvo el p%.

Para el modo de propagación (1), se aplica la siguiente expresión:

$$L_b(p) = P_t + G_t + G_r - P_r(p)$$

Donde:

p: porcentaje de tiempo máximo durante el cual la potencia de interferencia admisible puede ser rebasada.

$L_b(p)$: atenuación requerida mínima (dB) del modo de propagación (1) durante el p% del tiempo; este valor debe ser rebasado por la pérdida prevista en el trayecto del modo de propagación (1) durante todo el tiempo, salvo p%.

P_t : nivel de potencia transmisora disponible máxima (dBW) en la anchura de banda de referencia en las terminales de la antena de una estación transmisora terrena.

$P_r(p)$: potencia de interferencia admisible de una emisión interferente (dBW) en la anchura de banda de referencia que no será rebasada durante más de p% en las terminales de la antena de una estación receptora terrena que puede sufrir interferencia, cuando la emisión interferente se origina de una sola fuente.

G_t : ganancia (dBi) de la antena de la estación transmisora terrena.

G_r : ganancia (dBi) de la antena de la estación receptora terrena que puede sufrir interferencia.

Cabe mencionar que la potencia de interferencia admisible $P_r(p)$ se especifica con respecto al porcentaje de tiempo real durante el cual el receptor está en funcionamiento, y no del tiempo transcurrido total.

Con el fin de facilitar la determinación de los valores de G_r que se han de utilizar en un acimut desde la estación transmisora terrena, se deben hacer varias aproximaciones simplificadoras:

- Que el ángulo de elevación del horizonte de la estación receptora terrena es 0° en todos los acimuts;
- Que la estación receptora terrena funciona con un satélite que tiene inclinación orbital de 0° y que puede estar situada en cualquier parte de la órbita geoestacionaria por encima del ángulo de elevación mínimo, para la ubicación de la estación receptora terrena;
- Que la latitud de la estación receptora terrena es igual que la de la estación transmisora terrena;
- Que se puede utilizar geometría plana para interrelacionar los ángulos de acimut en las estaciones terrenas respectivas.

Las primeras tres hipótesis proporcionan la base para determinar la ganancia hacia el horizonte de la estación terrena receptora en cualquier acimut. La hipótesis del ángulo de elevación hacia el horizonte de 0° es conservadora porque el aumento de la ganancia de antena hacia el horizonte debido a la elevación del horizonte, en la práctica sería mayor que el desplazamiento por cualquier apantallamiento de emplazamiento real. El error en la determinación de la ganancia de la antena de la estación receptora terrena, utilizando estas hipótesis, no rebasaría los 2 dB.

Para el modo de propagación (2), hay un proceso de dispersión de volumen y se precisa una modificación del método anterior. Cuando el haz de la antena de la estación terrena coordinadora intercepta una célula de lluvia, se puede formar un volumen común con un haz de la estación terrena (que funciona en el sentido de transmisión opuesto en bandas de frecuencias atribuidas bidireccionalmente). Por tanto, se supone que el haz de la estación terrena ilumina toda la célula de lluvia, que está representada por un cilindro vertical que contiene hidrometeoros que producen una dispersión isotrópica de las señales. Este proceso de dispersión puede originar el acoplamiento accidental entre la estación terrena coordinadora y las estaciones terrenas que funcionan en bandas de frecuencias atribuidas bidireccionalmente, a través del volumen común.

La ganancia de la antena de la estación terrena y su anchura de haz son interdependientes. El tamaño del volumen común y el número de señales que han experimentado dispersión en ese volumen aumentan a medida que disminuye la ganancia de antena de la estación terrena que transmite o recibe estas señales, y un efecto compensa el otro. Por consiguiente, en el procedimiento para evaluar la interferencia que pueden producir los mecanismos del modo de propagación (2), se puede hacer una hipótesis simplificadora de que la atenuación de trayecto es independiente de la ganancia de la antena de la estación terrena.

Esto se define con la expresión:

$$L_x(p) = P_t + G_x - P_r(p)$$

Donde:

$L_x(p)$: atenuación mínima requerida para el modo de propagación (2)

G_x : ganancia de antena máxima (dBi) supuesta para la estación receptora terrena

El contorno del modo de propagación (2) se determina utilizando el ángulo de elevación y el acimut desde la estación terrena transmisora coordinadora hacia la estación espacial, con las dos consideraciones siguientes:

- La distancia de coordinación mínima será la distancia requerida para algunos acimuts;
- Y una distancia requerida correspondiente al caso más desfavorable determinada por la geometría de la dispersión por hidrometeoros para una estación terrena receptora situada en uno de los dos sectores acimutales de 6°. Dentro de estos sectores, se supone que la estación terrena receptora está funcionando en el ángulo de elevación mínimo hacia una estación espacial en la órbita geoestacionaria y que su haz principal intersecta el haz para la estación transmisora coordinadora en el punto donde el segundo haz pasa a través de la altura de la lluvia, h_R . Aunque la dispersión se puede producir en cualquier parte entre la estación terrena coordinadora y este punto, la intersección de los dos haces en este punto representa el caso de interferencia más desfavorable. En consecuencia, el resultado es la distancia requerida del caso más desfavorable para estaciones terrenas receptoras situadas en los dos sectores acimutales.

6.5.2 Ajustes del ángulo de elevación hacia el horizonte y de la distancia de la estación terrena.

Para el modo de propagación (1), la distancia requerida depende de las características del horizonte físico alrededor de la estación terrena. El horizonte se caracteriza por la distancia hasta el horizonte, d_h y el ángulo de elevación del horizonte, ϵ_h . El ángulo de elevación del horizonte se define aquí como el ángulo (grados), visto desde el centro de la antena de la estación terrena, entre el plano horizontal y un rayo que roza el horizonte físico en la dirección en cuestión. El valor de ϵ_h es positivo cuando el horizonte físico está por encima del plano horizontal y negativo cuando está por debajo.

Es necesario determinar los ángulos de elevación del horizonte y las distancias para todos los acimuts alrededor de una estación terrena. En la práctica, en general basta hacer esto en incrementos de acimuts de 5° . Sin embargo, se debe intentar identificar, y tomar en consideración, los ángulos de elevación del horizonte mínimos que pueden producirse entre los acimuts examinados en incrementos de 5° .

También es útil separar los efectos de propagación relacionados con el horizonte local alrededor de la estación terrena que, en algunos o en todos los acimuts, puede estar determinado por colinas o montañas cercanas, de los efectos de propagación en el resto del trayecto. Esto se logra refiriendo el modelo de propagación a un ángulo de elevación del horizonte de 0° para la estación terrena coordinadora, e incluyendo después un término específico A_h para tratar las características conocidas del horizonte de la estación terrena que está siendo coordinada. Cuando proceda, A_h modifica el valor de la pérdida de trayecto, en cada acimut, del cual se deriva la distancia requerida del modo de propagación (1).

Se han de considerar dos situaciones que puede cambiar el nivel de atenuación para la atenuación de trayecto del modo de propagación (1) para el caso de referencia de 0° :

- La primera es cuando la estación terrena coordinadora tiene un ángulo de elevación del horizonte positivo (en un determinado acimut). En este caso, aprovechará la atenuación de propagación adicional por difracción en el horizonte (lo que se denomina generalmente apantallamiento del emplazamiento). En consecuencia, la atenuación A_h es positiva y se reduce el valor de la atenuación de trayecto que se requiere, en comparación con el caso de referencia del ángulo de elevación del horizonte de 0° .
- La segunda situación es cuando la estación terrena coordinadora está en una ubicación por encima del primer plano local, y tiene un ángulo de elevación del horizonte negativo (hacia abajo) en un determinado acimut. En este caso, se necesita una medida de protección adicional, porque la distancia angular del trayecto a lo largo de la dirección radial se reduce y por tanto la pérdida de trayecto para una distancia dada será menor que para el caso del ángulo de elevación de 0° . Es conveniente tratar este efecto como parte del cálculo de apantallamiento del emplazamiento. Por consiguiente, en este caso la atenuación A_h será negativa y aumenta el valor de la atenuación de trayecto que se requiere, en comparación con el caso de referencia del ángulo de elevación del horizonte de 0° .

La contribución de la atenuación debida a las características del horizonte de la estación terrena coordinadora a la atenuación requerida mínima del modo de propagación (1) modifica el valor de la pérdida de trayecto que hay que calcular para los tres modelos del modo de propagación (1).

El valor de A_h se debe limitar para satisfacer las condiciones:

$$-10 \leq A_h \leq (30 + \varepsilon_h)$$

6.5.3 Límite de potencia y de ángulo de elevación para las estaciones terrenas

La potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) emitida en cualquier dirección hacia el horizonte por una estación terrena no debe exceder de los siguientes límites:

- a) En las bandas de frecuencias comprendidas entre 1 GHz y 15 GHz:
+40 dBW en cualquier banda de 4 kHz de anchura, para $\varepsilon_h \leq 0^\circ$
+40 + 3 ε_h dBW en cualquier banda de 4 kHz de anchura, para $0^\circ < \varepsilon_h \leq 5^\circ$; y
- b) En las bandas de frecuencias superiores a 15 GHz:
+64 dBW en cualquier banda de 1 MHz de anchura, para $\varepsilon_h \leq 0^\circ$
+64 + 3 ε_h dBW en cualquier banda de 1 MHz de anchura, para $0^\circ < \varepsilon_h \leq 5^\circ$,

En el caso de ángulos de elevación del horizonte superior a 5° , no existen limitaciones para el PIRE, emitido por una estación terrena.

Los límites indicados, pueden excederse en 10 dB como máximo, sin embargo, si se llegase a extender la cobertura hacia otro país, se tendría que dar la aprobación de la administración del país afectado para poder aumentar esta cobertura.

Por otro lado, las antenas de las estaciones terrenas no pueden utilizarse para la transmisión con ángulos de elevación inferiores a 3° , medidos desde el plano horizontal en la dirección de radiación máxima. Esto también es válido en el caso de antenas receptoras de estaciones terrenas.

6.5.4 Cálculo de la potencia de interferencia admisible de una emisión interferente

Para calcular la potencia de interferencia admisible de la emisión interferente, en la anchura de banda de referencia, que no se ha de rebasar durante más del p% del tiempo en la terminal de la antena receptora, teniendo en cuenta la interferencia procedente de una sola fuente, se utiliza la fórmula:

$$P_r(p) = 10 \log(kT_e B) + N_L + 10 \log(10^{M_s/10} - 1) - W \quad [\text{dBW}]$$

Donde:

K: constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K)

T_e : temperatura de ruido térmico del sistema receptor (K), en la terminal de la antena receptora.

N_L : contribución de ruido del enlace.

En el caso de un transpondedor de satélite, incluye el ruido del enlace ascendente, la intermodulación, etc. En ausencia de indicaciones, se supone un valor de $N_L = 1$ dB, únicamente para enlaces fijos por satélite.

B: ancho de banda de referencia (Hz), es decir, el ancho de banda en la estación receptora que está sujeto a interferencia y en el cual se puede promediar la potencia de la emisión interferente.

p: porcentaje de tiempo durante el cual la interferencia de una fuente puede rebasar el valor de potencia de interferencia admisible; como no es probable que las entradas de interferencia se produzcan simultáneamente:

$$p = p_0/n$$

p_0 : porcentaje de tiempo durante el cual la interferencia de todas las fuentes puede rebasar el valor umbral.

n: número de fuentes de interferencia de igual nivel y de igual probabilidad, que se supone no están correlacionadas durante pequeños porcentajes del tiempo.

M_s : margen de funcionamiento del enlace (dB)

El factor M_s es el factor por el cual habría que aumentar el ruido del enlace con condiciones de cielo despejado para igualar la potencia de interferencia admisible.

W: factor de equivalencia de ruido térmico (dB) para emisiones interferentes en el ancho de banda de referencia. Es positivo cuando las emisiones interferentes causan más degradación que el ruido térmico.

El factor W (dB) es el nivel de la potencia de ruido térmico de radiofrecuencia con respecto a la potencia recibida de una emisión interferente que, en lugar de la anterior y contenida en el mismo ancho de banda (de referencia), produciría la misma interferencia (por ejemplo, un aumento en la potencia de ruido del canal vocal o vídeo, o de la proporción de bits erróneos). El factor W generalmente depende de las características de las señales deseada e interferente.

Cuando la señal deseada es digital, W suele ser igual o menor que 0 dB, prescindiendo de las características de la señal interferencia.

La temperatura de ruido del sistema receptor, referida a las terminales de salida de la antena receptora, puede ser determinada a partir de:

$$T_e = T_a + (\ell_{t1} - 1)290 + \ell_{t1}T_r \quad [\text{K}]$$

Donde:

T_a : contribución de la temperatura de (K) ruido de la antena receptora.

ℓ_{t1} : valor numérico de la pérdida en la línea de transmisión entre la terminal de la antena y la etapa de entrada de receptor.

T_r : temperatura de ruido (K) de la etapa de entrada del receptor, incluidas todas las etapas sucesivas.

Cuando se determinan los contornos de coordinación entre dos estaciones terrenas que funcionan en el sentido de transmisión opuesto, se deben utilizar las siguientes temperaturas de ruido del sistema receptor de la estación terrena:

Gama de Frecuencias (GHz)	T_e (K)
$f < 10$	75
$10 < f < 17$	150
$f > 17$	300

Tabla 5: Temperatura de ruido equivalente para el sistema receptor de estaciones terrenas.

Capítulo 7 Prevención y Reducción de Interferencias en Satélites Geoestacionarios

7.1 Eficiencia en el uso de la órbita geoestacionaria y el espectro radioeléctrico

Es bien sabido que los recursos naturales del espectro de radiofrecuencia y la órbita geoestacionaria están en creciente demanda. Por ello, cuando se requiere colocar nuevos sistemas satelitales, o bien, se busca incrementar la capacidad de tráfico de los sistemas existentes, se debe tener un especial cuidado para poder optimizar el uso tanto de las frecuencias como de la órbita geoestacionaria para evitar causar interferencias en otros sistemas y poder preservar, lo mejor posible, estos limitados recursos globales.

Asumiendo un cierto espaciamiento entre satélites, operando en la misma banda de frecuencia, la cantidad de posiciones orbitales geoestacionarias es limitada. El problema es particularmente significativo en la banda C (6/4 GHz) y en la banda Ku (14/10-12 GHz) para las porciones de la órbita geoestacionaria que sirven en las regiones con el mayor volumen de comunicaciones, por ejemplo el arco de 49°E a 90°E (sobre el Océano Índico), de 135°O a 87°O (que sirve a Norteamérica) y de 1°O a 35°O (sobre el Océano Atlántico)

El crecimiento del tráfico en estas áreas tiene que ser acomodado con la inclusión de nuevas bandas de frecuencia (o extensiones de bandas ya utilizadas) o el uso de bandas de frecuencias más altas, lo que permitiría la reducción del espaciamiento entre satélites y por ello, un uso más eficiente de los anchos de banda y de la órbita.

Para un eficiente uso de la órbita geoestacionaria se recomienda lo siguiente:

- **Técnicas de modulación y codificación**

Para sistemas analógicos usando modulación en frecuencia (FM), a medida que el índice de modulación crece, la capacidad por satélite es reducida, pero la densidad de ruido en banda base debido a la interferencia dada en la razón C/I también cae. Esto permite un menor espaciamiento entre satélites y, por lo tanto, un uso más eficiente de la órbita geoestacionaria.

Para transmisiones digitales que usan modulación PSK (Phase-shift Keying), muy utilizada en la actualidad, la inmunidad a la interferencia de una señal se incrementa a medida que se reduce el número de fases, permitiendo un menor espaciamiento entre satélites, por ello, para los casos en que se tienen 4 u 8 fases, se puede considerar una configuración óptima para el uso eficiente de la órbita geoestacionaria.

Continuando con el caso de transmisión digital, la eficiencia en el uso del espectro también se puede incrementar si se utilizan técnicas de procesamiento de señales como:

- Codificación de baja tasa de transmisión (LRE) y multiplicación de circuitos digitales (DCM) para telefonía.
- Técnicas de reducción de la tasa de transmisión de bits para video y televisión (estándar MPEG) y para transmisión de datos.

Sin embargo, la codificación con corrección de error, FEC (Forward Error Correction), generalmente usada para mejorar la eficiencia de potencia, tiende a reducir la eficiencia espectral.

- **Procesamiento de señales a bordo**

La implementación de un procesamiento de señales dentro de los transpondedores regenerativos, permite optimizar los parámetros del enlace y permite una menor potencia de transmisión. Esto ayuda a reducir la interferencia con satélites adyacentes y con ello se incrementa la eficiencia en la utilización de la órbita geoestacionaria.

- **Homogeneidad entre redes**

La más eficiente utilización de la órbita geoestacionaria se podría obtener si todos los satélites alojados en ella, teniendo la misma área geográfica de iluminación y usando las mismas bandas de frecuencias, tuvieran las mismas características. Sin embargo, es obvio que en la realidad, esta homogeneidad es prácticamente imposible de obtenerse, debido a que distintos sistemas satelitales tienen distintas funciones, por lo que siempre existirán diferencias entre ellos.

Las características que diferencian a los sistemas satelitales generan una diferenciación del espaciamiento angular necesario para proteger a un sistema del otro sobre las interferencias generadas, sobre todo, por satélite adyacente. Siempre se debe de tomar en cuenta el mayor espaciamiento necesario entre los dos, para no afectar a ninguno de los sistemas.

Los elementos de los sistemas que más afectan en la eficiencia de la utilización de la órbita geoestacionaria y que utilizan la misma banda de frecuencia son:

- **Características de los lóbulos laterales de la antena de la estación terrena.**

El patrón de radiación de las antenas de la estación terrena, particularmente en los primeros 10° a partir del punto de máxima radiación en dirección al satélite geoestacionario, es uno de los más importantes factores que determinan la interferencia entre sistemas satelitales geoestacionarios. La reducción de los niveles de los lóbulos laterales puede incrementar significativamente la eficiencia en la utilización de la órbita.

- **Características de la antena del satélite**

Las antenas satelitales deben satisfacer dos condiciones para optimizar la utilización de la órbita y el espectro:

- I. Para lograr un mejor uso de la localización de la órbita, el patrón de radiación debe de ajustarse de la mejor manera al área de cobertura del servicio. Esta condición se puede cumplir utilizando complejos diseños de antenas, con alimentadores múltiples y haces irregulares.
- II. Fuera del área de cobertura del servicio, el nivel de los lóbulos laterales y el nivel del patrón de radiación deben de ser lo más pequeños posibles para minimizar la interferencia entre sistemas satelitales adyacentes.

- **Polarización cruzada**

El uso de polarización ortogonal, ya sea lineal o circular, permite una discriminación entre transmisión y recepción en la misma banda de frecuencias en un mismo satélite. Los valores típicos para el aislamiento entre polarizaciones rondan entre los 30 y 35 dB para buenos diseños de alimentadores de antenas. Esto aumenta la discriminación que proveen las propiedades de direccionalidad

La ventaja de implementar sistemas con polarización ortogonal es, como se mencionó anteriormente, la reutilización de frecuencia, la cual permite multiplicar por dos la capacidad de tráfico, y esto, combinado con las técnicas de aislamiento espacial, aumentaría todavía más la capacidad de tráfico del sistema.

7.2 Precisión de puntería de las antenas de satélites geoestacionarios

Con el fin de evitar interferencias inaceptables, la puntería de una antena instalada en un satélite geoestacionario en la dirección de máxima radiación de todo haz dirigido hacia la Tierra se debe mantener dentro de los valores:

- a) 10% de la abertura del haz entre puntos representativos de la mitad de potencia, con relación a la dirección de puntería nominal
- b) 0.3° con relación a la dirección de puntería nominal, debiendo tomarse el valor que resulte mayor. Esto, siempre y cuando, el haz tenga una cobertura menor que la mundial.

Cuando el haz no es simétrico con relación al eje de máxima radiación, la tolerancia en cualquier plano que contenga este eje se referirá a la abertura del haz entre puntos de media potencia en dicho plano.

7.3 Mantenimiento de la posición en longitud de los satélites geoestacionarios para servicio fijo por satélite

Los satélites, gracias a las fuerzas perturbadoras que actúan sobre ellos, tienden a modificar su órbita, esto provoca que requieran realizar maniobras para mantenerse dentro de ciertos límites, en el caso de los satélites geoestacionarios, dentro del cubo imaginario que delimita su posición orbital.

Las antenas de las estaciones terrenas, necesitan que el satélite se mantenga en su posición, para poderlo ver y que la dirección de máxima ganancia de las antenas apunte directamente al satélite.

Un buen mantenimiento de la posición permitiría una disminución en la posible interferencia entre satélites adyacentes, además de lograr una menor separación angular entre ellos, lo que beneficia el aumento de la capacidad de la órbita geoestacionaria.

Por ello, se recomienda mantener la posición de los satélites dentro de $\pm 0.1^\circ$ de longitud con relación a su posición nominal y en casos particulares, dentro de $\pm 0.5^\circ$.

La precisión con que se puede mantener la posición depende, hasta cierto punto, de la exactitud de la determinación de la órbita. La determinación de la órbita de los satélites geoestacionarios se basa generalmente en mediciones de distancia en dos estaciones distantes entre sí o en mediciones de distancia y de los ángulos de acimut y de elevación en una sola estación. No es posible determinar la órbita efectuando mediciones de distancia en una sola estación.

La calibración apropiada de la determinación de distancias y, en particular, de las mediciones de los ángulos permite determinar la posición en longitud del satélite con una exactitud de unas pocas milésimas de grado.

Para una estación terrena que funciona con una estación espacial geostacionaria, ésta parece inmóvil con respecto a la Tierra. Sin embargo, las variaciones de las fuerzas de gravitación que actúan en la estación espacial y las limitaciones en el control de posición significan que los parámetros orbitales de la estación espacial geostacionaria no son constantes.

El mantenimiento de la posición en longitud se efectúa mediante correcciones orbitales Este-Oeste que ajustan el semieje mayor y la excentricidad a sus valores deseados. En la práctica, los elementos orbitales ajustados después de una corrección tienen errores, debido al funcionamiento impreciso de los propulsores del satélite.

El movimiento con respecto a la posición orbital nominal de la estación espacial en un sentido este/oeste (tolerancia longitudinal) está limitado en el Reglamento de Radiocomunicaciones, pero no se especifica el movimiento en el sentido norte/sur (excursión de inclinación). Eligiendo la dirección de propulsión Norte-Sur ideal se logra que la corrección orbital N-S, cuya función es mantener la inclinación dentro de un límite determinado, no altere el desplazamiento longitudinal. En la práctica, no obstante la propulsión tiene un componente que no es Norte-Sur producido por los errores de control. En consecuencia, puede producirse un cambio imprevisto del desplazamiento longitudinal.

El conjunto de estos factores determina el error de mantenimiento de la posición en longitud, pero comúnmente el más importante es la interacción entre la corrección orbital N-S y el desplazamiento longitudinal.

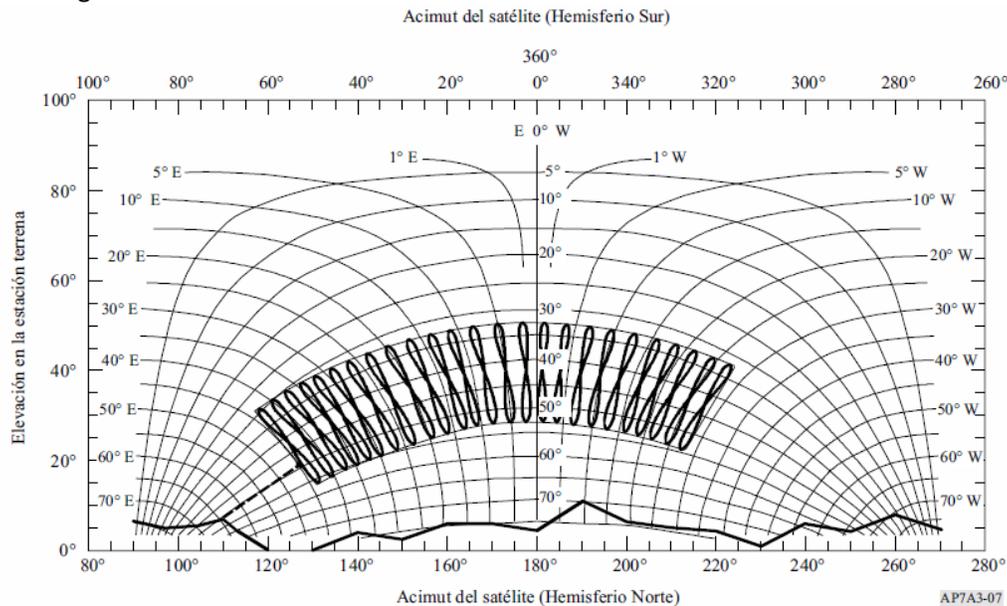


Figura 7-1: Apuntamiento de satélites geostacionarios desde 28°W hasta 44°E con 110° de acimut por medio de una estación terrena con latitud 43°.

La mitigación del mantenimiento en posición en el sentido norte/sur de una estación espacial geostacionaria permite que su órbita se incline, con una inclinación que aumenta gradualmente con el tiempo. Por consiguiente, la determinación de la zona de coordinación requiere considerar la amplitud del movimiento de la antena de la estación terrena. Aunque en la práctica la dirección de puntería de la antena de estación terrena puede variar en función del tiempo, la antena de la estación terrena puede también estar apuntando en un sentido durante periodos de tiempo considerables. Por tanto, se supone que la ganancia de la antena de la estación terrena en la dirección del

horizonte es constante. Para una estación terrena que funciona con una estación espacial en una órbita como la descrita anteriormente, la hipótesis de ganancia hacia el horizonte constante a medida que aumenta el ángulo de inclinación puede conducir a una estimación conservadora de la zona de coordinación, que aumenta al aumentar el ángulo de inclinación.

En el caso de estaciones terrenas que funcionan en algunas bandas de frecuencias, puede haber atribuciones con igualdad de derechos a servicios espaciales que funcionan en sentido Tierra-espacio y espacio-Tierra. En esta situación, cuando dos estaciones terrenas están funcionando en sentidos de transmisión opuestos, sólo es necesario establecer la zona de coordinación para la estación terrena transmisora, pues las estaciones terrenas receptoras son tomadas en consideración automáticamente. Por consiguiente, una estación terrena receptora que funciona en una banda de frecuencias atribuida bidireccionalmente sólo se coordinará con una estación terrena transmisora si está situada dentro de la zona de coordinación de ésta.

7.4 Espaciamento o separación angular de los satélites geoestacionarios

Como se mencionó en capítulos anteriores, las posiciones orbitales están asignadas de acuerdo a la zona geográfica. Observando la Figura 1-6, se ven arcos de la órbita geoestacionaria vacíos, esto es debido a que las posiciones orbitales de esos arcos están en regiones poco pobladas, por ejemplo el Océano Pacífico; por el contrario, hay regiones sobrepobladas, como América y Europa.

A medida que se desarrollan las comunicaciones globales y los sistemas satelitales crecen, ha sido necesario reducir cada vez más el espacio entre satélites para poder tener disponible mayor cantidad de posiciones orbitales en aquellos arcos sobrepoblados.

Para este problema, la UIT ha realizado estudios para determinar la mínima separación angular entre satélites en la órbita geoestacionaria, tomando como referencia a los lóbulos laterales de las antenas utilizadas en las estaciones terrenas.

Definir un diagrama de radiación para las antenas permite controlar el PIRE fuera del eje principal de radiación y la potencia recibida por los lóbulos laterales, consiguiendo una utilización más eficaz de la órbita geoestacionaria.

La UIT recomienda que las antenas de estaciones terrenas que funcionan con satélites geoestacionarios tengan un objetivo de diseño por el que la ganancia, G , del 90% por lo menos de las crestas de los lóbulos laterales no exceda de:

$$G = 29 - 25 \log \theta$$

Donde:

G : Ganancia con relación a una antena isotrópica.

θ : Ángulo con respecto al eje en la dirección del satélite.

Este requisito debe cumplirse para valores del ángulo comprendidos entre 1° ó $(100 \lambda/D)$, tomando el valor superior, y 20° para cualquier dirección fuera del eje que forme un ángulo de hasta 3° con la órbita geoestacionaria.

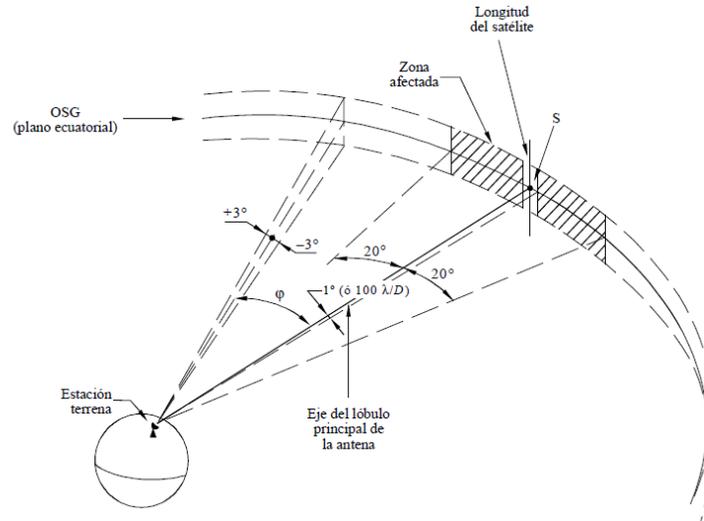


Figura 7-2: Ejemplo de la zona alrededor de la órbita geostacionaria a la que se le aplica el objetivo de diseño para antenas de estaciones terrenas.

Por otro lado, de acuerdo a la regulación de la FCC (Federal Communications Commission), al igual que en la UIT, especifica la relación de niveles para los lóbulos laterales de las estaciones terrenas que transmiten a satélites geostacionarios, de la siguiente manera:

$$\begin{array}{ll}
 29 - 25 \log \theta \text{ dBi} & 1^\circ \leq \theta \leq 7^\circ \\
 8 \text{ dBi} & 7^\circ \leq \theta \leq 9.2^\circ \\
 32 - 25 \log \theta \text{ dBi} & 9.2^\circ \leq \theta \leq 48^\circ \\
 -10 \text{ dBi} & 48^\circ \leq \theta \leq 180^\circ
 \end{array}$$

Donde θ es el ángulo con respecto a la dirección del lóbulo principal de la antena.

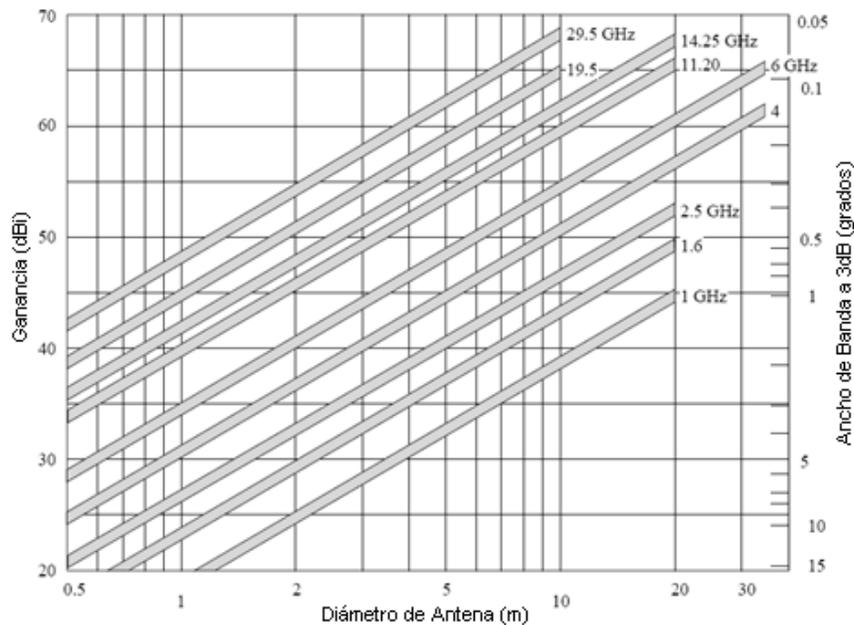


Figura 7-3: Relación de la ganancia y el ancho del haz principal con el diámetro de la antena y la banda de frecuencia en la que operan.

Una vez teniendo el objetivo de diseño del patrón de radiación, se puede obtener la separación mínima entre satélites considerando las frecuencias a utilizar, ya que esto permite conocer la longitud de onda y, por lo tanto, el diámetro de las antenas. Como se sabe, a mayor diámetro de antena, se tendrá mayor directividad y, por lo tanto, un lóbulo principal más pequeño, lo que permite tener a los satélites con menor separación angular. En la actualidad, para las comunicaciones satelitales en órbita geoestacionaria, las bandas C, Ku y Ka son las más utilizadas.

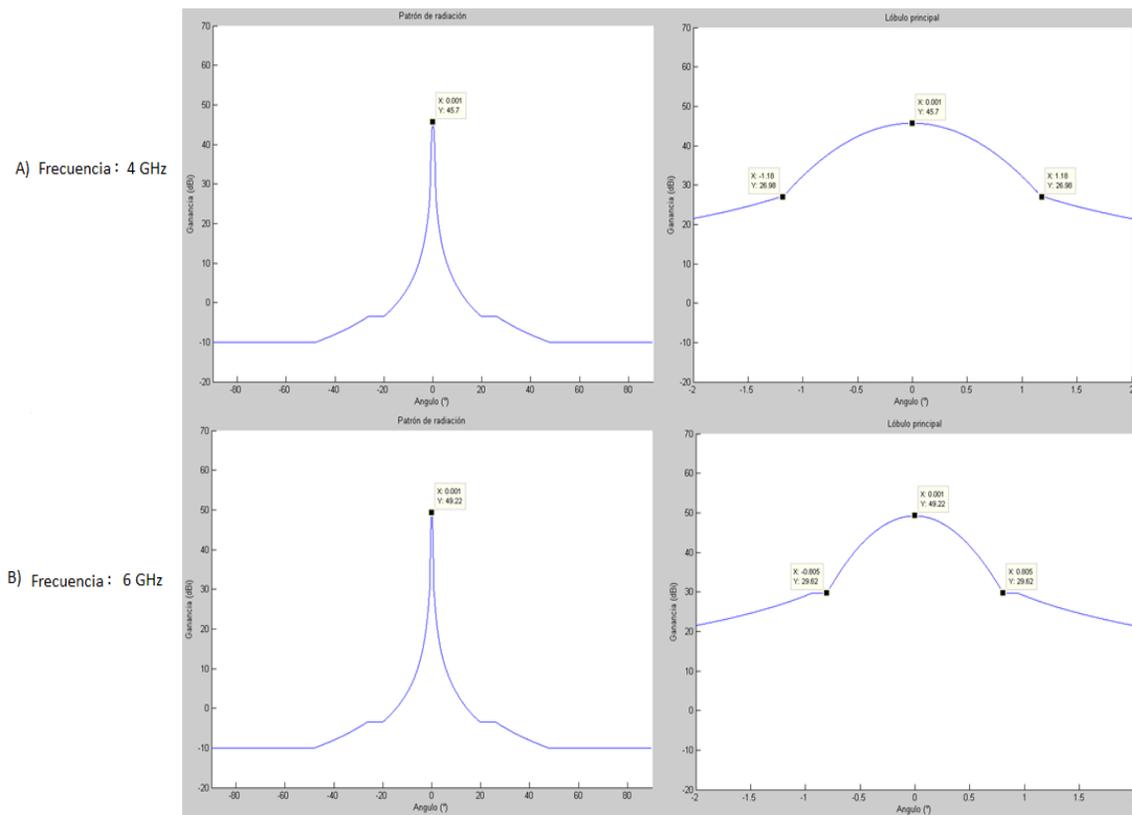


Figura 7-4: Patrón de radiación para una antena de 5.5 metros operando en banda C. A) Enlace ascendente. B) Enlace descendente.

La Figura 7-4 muestra un ejemplo del patrón de radiación teórico de una antena típica que transmite en banda C cumpliendo con la recomendación de la UIT. Como se sabe, el enlace ascendente trabaja en el rango de 3.7 – 4.2 GHz y el descendente de 5.925 -6.425 GHz. Para deducir la separación necesaria entre satélites, el lóbulo principal solo deberá transmitir hacia un satélite, por ello el tener 2° de separación para banda C permite minimizar considerablemente las interferencias entre sistemas satelitales adyacentes y puede mejorar si se utilizan antenas de mayor diámetro.

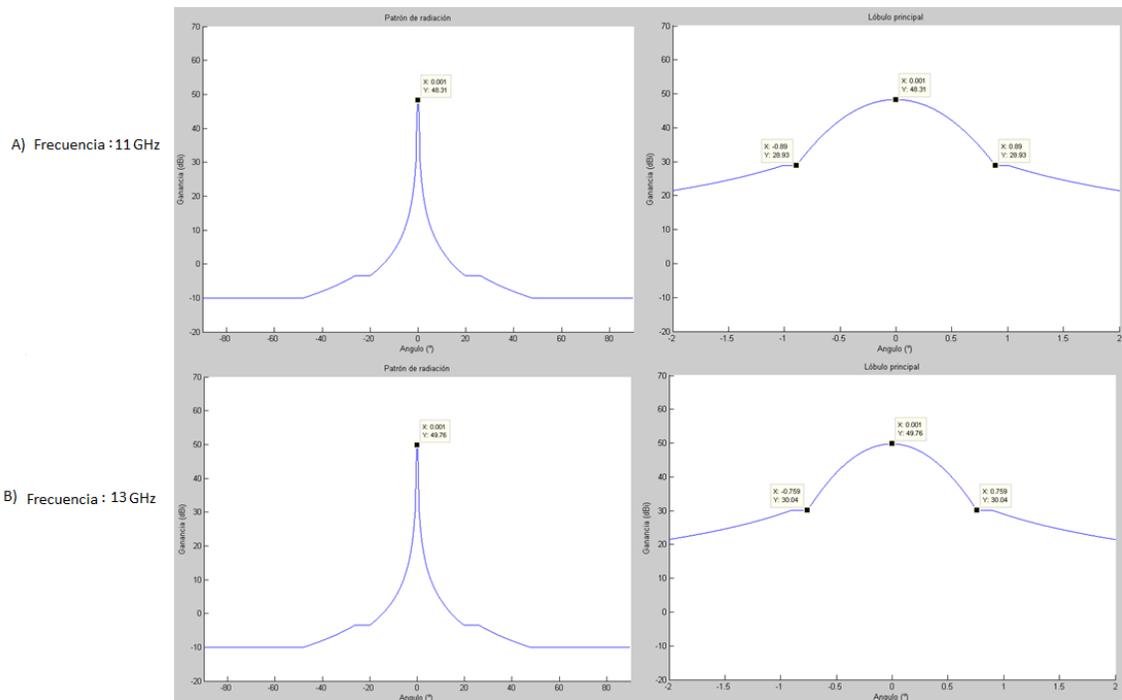


Figura 7-5: Patrón de radiación para una antena de 2.7 metros operando en banda Ku. A) Enlace ascendente. B) Enlace descendente.

Para el caso de antenas de estaciones terrenas que operan en banda Ku, el panorama mejora, ya que son más directivas (como se observa en la Figura 7-5), con la ventaja de utilizar antenas de menor diámetro. En este caso, únicamente utilizando banda Ku, la separación entre satélites podría ser hasta de 1° , doblando la capacidad de la órbita geoestacionaria.

En la actualidad, se tienen satélites con separación de hasta 1.9° , gracias a la coordinación y regulación de operadores satelitales de países que comparten arcos o de la órbita geoestacionaria (por ejemplo México, Estados Unidos y Canadá en América del Norte).

Por último, cabe mencionar que en la separación angular entre satélites se tiene en cuenta el llamado ángulo geocéntrico, lo que en algunas ocasiones se llega a confundir con el ángulo topocéntrico, siendo el primero, el ángulo tomando en cuenta el centro de la Tierra, y el segundo, el ángulo visto desde una estación terrena hacia la órbita geoestacionaria.

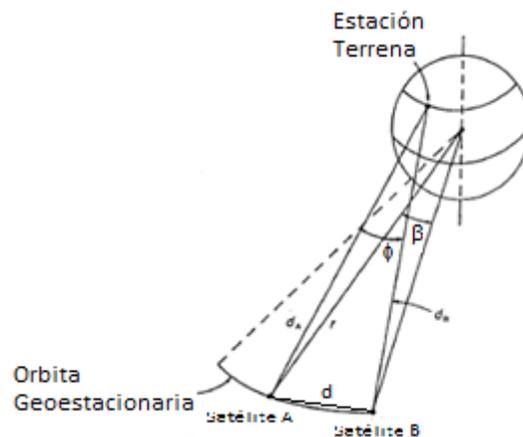


Figura 7-6: Separación de dos satélites geoestacionarios vistos desde una estación terrena.

Tomando como referencia la Figura 7-6, donde β es la separación entre dos satélites geoestacionario (ángulo geocéntrico); ϕ es la separación angular entre 2 satélites geoestacionarios vistos desde una estación terrena (ángulo topocéntrico); d_A y d_B son los rangos del satélite A y el satélite B respectivamente, para la estación terrena; r es la órbita geoestacionaria; y d es la separación entre dos satélites.

Usando la Ley de cosenos se obtiene:

$$d^2 = d_A^2 + d_B^2 - 2d_A d_B \cos \phi$$

También se relaciona d con β usando:

$$d^2 = 2r^2 + 2r^2 \cos \beta = 2r^2(1 + \cos \beta)$$

Comparando las ecuaciones y despejando ϕ se concluye que:

$$\phi = \cos^{-1} \left[\frac{d_A^2 + d_B^2 - 2r^2(1 + \cos \beta)}{2d_A d_B} \right]$$

Conversión muy útil para conocer el ángulo de separación a partir de una antena de la estación terrena. El ángulo topocéntrico es muy parecido al geocéntrico para antenas ubicadas en la línea ecuatorial, pero a medida que se alejan de ésta, la diferencia entre ángulos será mayor, lo que tiene que tomarse en cuenta para el diseño de las antenas.

7.5 Técnicas de geolocalización

Las interferencias intencionales representan un porcentaje muy pequeño del total de ocurrencias de interferencia en sistemas satelitales geoestacionarios, sin embargo, cuando estos suceden, es necesario resolverlos lo más pronto posible siendo el primer paso, y el más importante, ubicar el lugar en el que es transmitida aquella señal interferente. Para lograr esto se requiere realizar un proceso de geolocalización.

El concepto de geolocalización está referido, en términos generales, a la determinación de la locación de un vehículo, persona u objeto en la Tierra. En este caso particular, la localización de la fuente de una señal (transmisor) depende de la obtención de una combinación de parámetros tales como frecuencia, tiempo y espacio.

7.5.1 Sistemas de Geolocalización basados en un solo satélite

Para los sistemas de geolocalización basados en un solo satélite se requieren circuitos especiales ubicados dentro de éste. Estos circuitos son: un interferómetro y una antena directiva con detector de energía escaneando la Tierra o una antena especial montada en el satélite con arreglo tridimensional.

Una técnica que no requiere de circuitos especiales está basada en la velocidad residual de satélites geoestacionarios cercanos. Esto parte del hecho de que estos satélites nunca están totalmente estacionados en una posición, ya que existen perturbaciones orbitales que cambian con el tiempo. Como se explicó en capítulos anteriores, los satélites se encuentran dentro de una caja imaginaria

y es necesario realizar ciertas acciones correctivas desde tierra para mantenerlos en su posición nominal.

Los lentos movimientos de los satélites geoestacionarios crean un pequeño corrimiento en frecuencia (corrimiento Doppler). Estos corrimientos pueden llegar a ser del orden de $\pm 0.25^\circ$ Este-Oeste y $\pm 0.1^\circ$ Norte-Sur. Tomando en cuenta la excentricidad de la órbita que está entre los 4.7×10^{-5} y 3.6×10^{-4} , se realiza un cálculo de la máxima velocidad residual de acuerdo al corrimiento Doppler para la frecuencia de la portadora utilizada, por ejemplo: para una portadora de 406 MHz con un corrimiento en frecuencia de 2.27 Hz, se tendría una máxima velocidad residual de 1.68 m/s, tomando en cuenta una excentricidad de 3.6×10^{-4} . Sin embargo, para utilizar este método es necesario contar con osciladores muy estables en el satélite o circuitos muy complejos en la base terrena para lograr mediciones muy precisas del corrimiento en frecuencia.

7.5.2 Sistemas de Geolocalización basados en dos satélites

El contar con dos satélites provee de diversidad espacial que permite utilizar las antenas de cada satélite como una antena en arreglo de fase con dos o más elementos y por ello, se podrían utilizar técnicas de interferometría.

Estas técnicas se caracterizan por realizar mediciones de la señal interferente que se propaga en dos satélites de comunicación ubicados en la órbita geoestacionaria. Debido a las finitas dimensiones de la antena transmisora, cuando se tiene una señal interferente que viaja en dirección del satélite principal o interferido, existen lóbulos laterales de niveles variables en la dirección de satélites adyacentes. Si estos satélites trabajan en bandas de frecuencias dentro de las cuales se tiene la frecuencia de transmisión, entonces se tendrán versiones con menor potencia de la señal interferente que pueden ser recibidas en tierra. Por ello, las señales de los dos satélites pueden ser observadas a través de una estación de monitoreo.

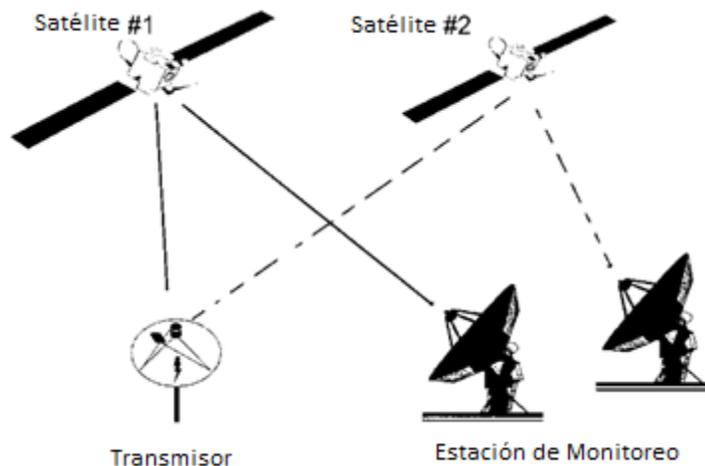


Figura 7-7: Configuración de un sistema de geolocalización que utiliza múltiples satélites.

7.5.3 Detección

Las técnicas de geolocalización requieren de un sistema de detección, debido a que la señal transmitida en los satélites adyacentes es muy débil, por lo que se recurre a la llamada CAF (Cross Ambiguity function), técnica de correlación que utiliza compensación tanto en tiempo como en frecuencia.

Esta función está definida por:

$$A(\tau, \nu) = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} s_1(t) s_2^*(t + \tau) e^{-i2\pi\nu t} dt$$

donde s_1 y s_2 son funciones complejas de las dos señales que contienen una componente en común, τ y ν son los parámetros de tiempo y frecuencia compensados, buscados simultáneamente para que el valor de $|A(\tau, \nu)|$ sea el máximo, y T es la duración de la correlación.

Una vez realizada la correlación, se calcula el SNR, el cual está dado por:

$$SNR = \frac{2 BT snr^2}{k[1 + snr(1 + 1/k)]}$$

donde snr es el SNR en la entrada del canal del satélite principal (medido en el receptor del enlace de bajada), B es el ancho de banda del ruido de canal (se asume idéntico en ambos canales), T es el tiempo de integración, y k es el factor de exceso, que se define como:

$$k = \frac{snr \text{ (canal principal)}}{snr \text{ (canal excedido)}}$$

El término $2BT$ es conocido como Ganancia de Procesamiento (PG). De acuerdo a la razón de Nyquist, se tienen $2BT$ muestras independientes en un periodo de tiempo T , por lo tanto:

$$2 BT = N$$

donde N es el número de puntos muestra por canal. En la práctica, esto determina el poder de procesamiento de un TLS.

Para poder identificar el pico de correlación, es necesario que este exceda el valor del ruido de fondo, considerando que existen correlaciones espurias debido al ruido, la SNR obtenida después de la correlación debe ser de por lo menos 20 dB.

La directividad de la antena transmisora, la sensibilidad de los canales satelitales, la buena implementación del sistema de monitoreo de la estación terrena, y el PG del equipo utilizado para el procesamiento de la señal, son factores que se relacionan con la efectividad en la detección de la señal interferente.

Debido a la gran variedad de niveles de señal, tipos de antena y tipos de onda en las comunicaciones satelitales y en la posibilidad de interferencias exteriores, es difícil determinar, en general, cuando la señal puede ser detectable en un satélite adyacente. Además de las características de radiación de la antena transmisora y de la potencia de transmisión, el impacto que tiene sobre otras señales en los canales tanto del satélite interferido como del adyacente, deben ser considerado (por ejemplo intermodulación o señales inducidas en polarizaciones contrarias). Estas señales deben de tratarse como simples contribuciones de ruido.

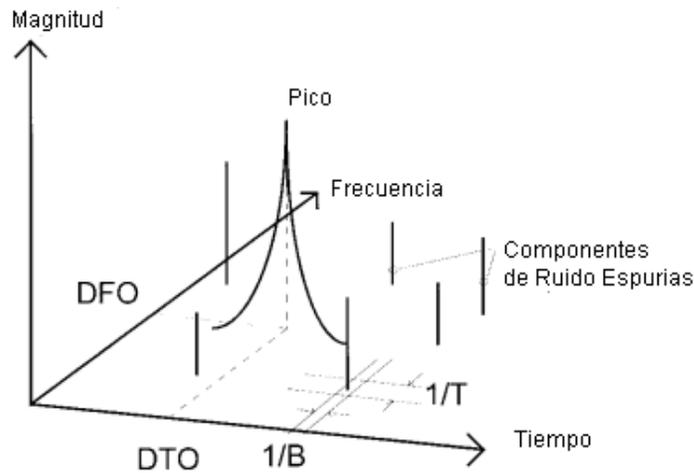


Figura 7-8: CAF y componentes espurias de ruido.

De acuerdo a la relación entre la SNR de recepción de las dos terminales terrenas y al rendimiento de la antena, es posible inferir el tamaño de la antena posible a detectar para una separación angular dada de los satélite, o al contrario, dado el tamaño de la antena, cual es la máxima separación angular para la cual es posible la detección de la señal en el canal del satélite adyacente.

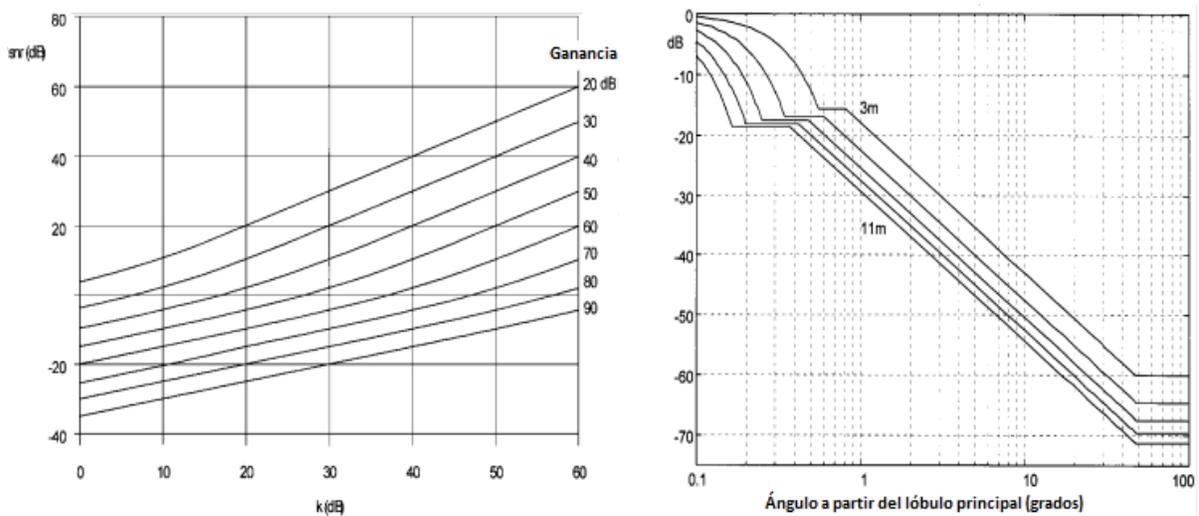


Figura 7-9: Relación entre el SNR del canal principal y la discriminación entre los dos canales con PG como parámetro. Se toma en cuenta una SNR después de la correlación de 20 dB. Y el patrón de radiación de distintas antenas de banda Ku, tomando en cuenta su diámetro.

Para ejemplificar esto, si se tuviera un TLS con PG de 60 dB, asumiendo que la señal tiene un SNR de 10 dB medida en el satélite interferido. Considerando la sensibilidad del canal del satélite adyacente idéntica a la del canal del satélite interferido. De acuerdo a la Figura. se tiene que con un valor k de 50 dB se puede obtener una adecuada correlación. Por otro lado, la detección puede ser realizada con satélites alejados más de 6° de la dirección del transmisor con una antena de 11m de diámetro y con satélites 20° apartados utilizando una antena de 3m.

De acuerdo a los parámetros utilizados, las técnicas utilizadas en los sistemas de geolocalización se pueden dividir en tres:

- Time Difference of Arrival (TDOA)
- Frequency Difference of Arrival (FDOA)
- FDOA/TDOA

TDOA se obtiene a partir de la diferencia en la longitud de los dos distintos caminos que toma la señal para viajar del transmisor hacia cada satélite. Conociendo la ubicación de los dos receptores en tierra que detectan ambas señales, además de la distancia entre los satélites y la estación terrena, se realiza la estimación con la diferencia de tiempos de llegada, gracias a un sistema receptor de dos canales capaz de estimar con precisión la diferencia de retardo entre los dos caminos.

Debido a su geometría, se le conoce como posicionamiento hiperbólico, ya que, dado que se conoce la ubicación de los dos receptores y además se conoce el TDOA, la posible ubicación de la fuente de la señal se encuentra en una mitad de un hiperboloide de dos hojas.

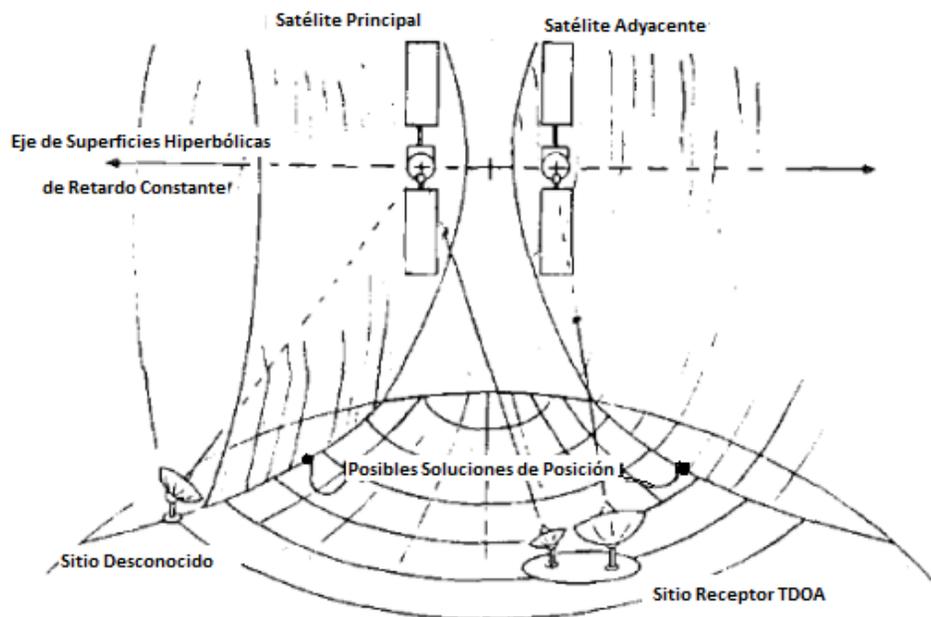


Figura 7-10: Geometría tridimensional de TDOA.

Una ventaja del uso de TDOA es que permite localizar la fuente de la señal sin necesidad de interrumpir las transmisiones actuales realizadas por los dos satélites, ya que no requiere ningún equipamiento adicional en ellos.

Otra característica importante es su capacidad para localizar fuentes generadoras de un amplio rango de tipos de señal. Casi cualquier señal modulada (video, audio, digital, etc.) puede ser localizada basándose en la medida de la diferencia en el tiempo de retardo de una porción de la forma de onda. Inclusive aquellas señales de ruido pseudoaleatorio pueden ser localizadas utilizando una variable de tiempo de retardo correlacionado para inferir la diferencia en tiempo de retardo. Sin embargo, cuando se presenta el caso de querer localizar una señal CW (Continuous Wave) conocida como senoidal pura o portadora limpia (debido a que no está modulada y, por lo tanto, no con-

tiene información) resulta imposible obtener un resultado no ambiguo, ya que para que esto suceda, el periodo de la señal CW tendría que ser mayor a la diferencia de tiempo de retardo.

Un problema del uso de TDOA como única herramienta de localización, es que el transmisor se localiza dentro de una curva en la superficie terrestre generada por la diferencia de tiempos de llegada, el problema reside en que la curva es de gran longitud, dejando como resultado una superficie muy amplia para poder definir la ubicación de la fuente.

Para resolver el problema de la ambigüedad se pensaron en varias soluciones. La primera consistió en usar la multilateración, que consiste en utilizar más de dos receptores, los cuales reciben la señal transmitida por el satélite y, por medio de una unidad central, localizan de manera más precisa la fuente de transmisión, sin embargo, tendrían que estar a una cierta distancia para poder funcionar y aun así no resolverían el problema de encontrar fuentes generadoras de señales CW.

Otra opción consistía en utilizar un satélite adyacente adicional, esto quiere decir, contar con 3 caminos distintos, el satélite principal y 2 adyacentes, de esta forma, se podría trazar una curva distinta para la diferencia de tiempos de llegada, generaría dos superficies que no serían más que mitades de hiperboloides. El transmisor se encontraría en la intersección de las dos, sin embargo esto no elimina la ambigüedad, ya que la intersección de dos superficies solo generaría una curva y no un punto en el mapa.

Un problema común en los dos métodos propuestos es que requieren infraestructura extra y que sería implementada con la única función de ayudar a la geolocalización y, sin embargo, no serían suficientes para tener resultados precisos.

FDOA también llamada diferencial Doppler, es una técnica análoga a TDOA. Como su nombre lo dice, utiliza el efecto Doppler para obtener la ubicación del transmisor gracias a una diferencial calculada a través de las diferentes posiciones de cada receptor y a la velocidad relativa de cada satélite, gracias a que estos están en constante movimiento, ya que si tanto los satélites, como los receptores estuvieran fijos, no se podría dar el efecto Doppler necesario para esta técnica.

A diferencia de TDOA, la infraestructura y la configuración necesaria para FDOA es muy compleja, lo que conlleva a requerir equipos más caros y robustos. La ventaja de este método es que puede encontrar transmisores aun a pesar de que estos transmitan portadoras puras o CW, a diferencia de TDOA que le resulta muy complicado poder predecir la ubicación de transmisores de este tipo.

La desventaja más importante de este método es el tiempo que tarda en dar un resultado, debido a la gran cantidad de datos que requiere para poder realizar la correlación cruzada, necesaria para el cálculo de desplazamiento Doppler.

Al igual que TDOA, con FDOA se obtienen curvas, en este caso, perpendiculares a aquellas obtenidas con la otra técnica, esto debido a que una trabaja en tiempo y la otra en frecuencia, obteniendo componentes ortogonales.

7.5.4 Estimación de las componentes de diferencia de tiempo y de frecuencia

Para la estimación, ya sea en el caso de TDOA o de FDOA, se utiliza una variable de incertidumbre definida como:

$$\sigma_{\tau} = \frac{1}{B_u \sqrt{SNR}} ; \sigma_v = \frac{1}{T_u \sqrt{SNR}}$$

Donde σ_τ es la incertidumbre de la diferencia de tiempo y σ_ν es la incertidumbre de la diferencia de frecuencia en unidades rms. SNR es la obtenida después de la correlación y los términos B_u y T_u son el ancho de banda y la duración de la señal, respectivamente, también con unidades rms, los cuales se obtienen con:

$$T_u = 2\pi \frac{\sqrt{\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} t^2 |u(t)|^2 dt}}{\sqrt{\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |u(t)|^2 dt}};$$

$$B_u = 2\pi \frac{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 G_u(f) df}}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} G_u(f) df}}$$

Donde $u(t)$ es la señal en el dominio del tiempo y G_u es la densidad espectral de potencia de la señal.

Con esto, dado un valor asumido de SNR, la precisión de la estimación de diferencia de tiempo de llegada depende directamente del ancho de banda de la señal y, por el otro lado, la precisión de la estimación de diferencia de frecuencia de llegada dependerá directamente de la duración de la señal.

Por ello para el caso de señales moduladas, las cuales tiene un mayor ancho de banda que las CW, es más conveniente utilizar TDOA al tener un máximo ancho de banda, en cambio, para el caso de señales CW, lo ideal es utilizar FDOA, siendo esta, una técnica que requiere un tiempo considerable para el procesamiento de los datos pero que no depende del ancho de banda de la señal.

Además de estos parámetros, también es conveniente tomar en cuenta otras contribuciones de error, tales como el equipo de medición, la propagación y les efemérides del satélite. Por ejemplo: los efectos de propagación pueden retrasar las señales, lo cual afecta directamente a la medición de la diferencia de tiempo de llegada, además de los errores en la posición del satélite. Las diferencias en el oscilador de translación del satélite y errores en la velocidad relativa afectarán directamente a la diferencia de frecuencia de llegada.

Para disminuir estos errores se suele utilizar una señal de referencia transmitida a través de una terminal conocida y bien localizada. Dicha señal se transmite tanto en el satélite principal como en el adyacente y se recibe en los receptores utilizados para la estimación. Esto tiene como beneficios:

- Eliminación de los errores de oscilación del satélite y retraso de la señal provocados por efectos de propagación, teniendo una señal de referencia con la cual se comparan esos efectos.
- La señal de referencia originada de un punto conocido permite localizar al transmisor desconocido a una distancia relativa con respecto al transmisor conocido. Gracias a esto, errores de posición y velocidad que producen efectos en TDOA y FDOA que son comunes a ambos transmisores pueden ser reducidos considerablemente.

7.5.5 Combinación de técnicas FDOA y TDOA

En la actualidad se utilizan técnicas que combinan ambos parámetros: TDOA y FDOA. Estos valores se utilizan para generar líneas de posición las cuales se dibujan en una computadora que genera

un mapa. La intersección de las líneas de posición se utiliza para obtener lo que se conoce como elipse de probabilidad dentro del cual se encuentra el transmisor que genera la señal interferente. Las mediciones se pueden realizar con cualquier combinación, ya sea TDOA/TDOA, FDOA/FDOA y FDOA/TDOA. Cada combinación tiene sus usos en diferentes escenarios de interferencia, pero por mucho, el método más rápido para la localización de un emisor es FDOA/TDOA.



Figura 7-11: Elipses de probabilidad.

Esta técnica requiere únicamente dos satélites monitoreando simultáneamente, en comparación con TDOA/TDOA que requiere de 3 satélites y FDOA/FDOA que requiere que los satélites cambien de posición.

Con todas las implicantes de tener TDOA y FDOA por separado, lo ideal es juntarlos. FDOA por su gran capacidad de medición de todo tipo de escenarios de interferencia y TDOA por la rapidez en las mediciones. Esta combinación permite obtener estimaciones de geolocalización instantáneas usando únicamente dos satélites. También se cuenta con escenarios de interferencia que TDOA solo no podría resolver. Por ejemplo, el hecho de que las líneas de FDOA varían de acuerdo a la superficie de la tierra en periodos relativamente cortos de tiempo es una ventaja ya que permite la localización rápida y precisa de señales que no están moduladas, pero tienen una frecuencia constante.

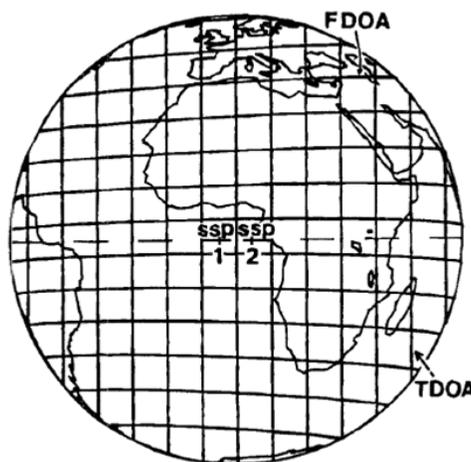


Figura 7-12: Líneas de posición utilizando FDOA/TDOA con 2 satélites.

Para satélites más viejos, un error dominante es el ruido de fase en el transpondedor. Por esto, un buen sistema de geolocalización debe tener la capacidad de eliminar los efectos de este ruido y

producir mediciones de TDOA y FDOA corregidas. Esto incrementa drásticamente la precisión en la estimación. El no eliminar los efectos del ruido de fase podría reducir mucho esta precisión, incluso llegando al punto de ser inútil la medición.

Estos sistemas de geolocalización suelen ser implementados para su uso fácil y rápido en interfaces gráficas o GUI (Graphic User Interface) las cuales se conectan al equipo de medición, un procesador digital de señales, un generador de señales y la cadena ascendente de transmisión de la estación terrena que se usarán para estimar la zona de donde proviene la señal interferente.

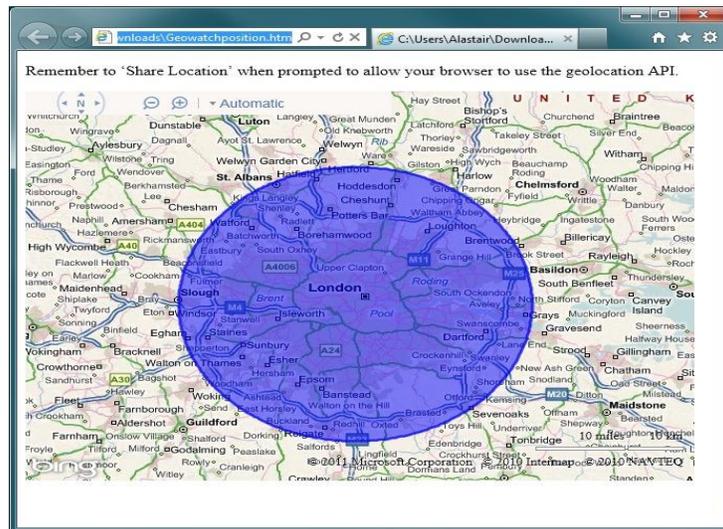


Figura 7-13: Elipse de probabilidad obtenida a través de una interfaz gráfica (GUI).

Una vez que se tiene ubicada la elipse, el siguiente paso es buscar posibles lugares de donde proviene la transmisión, y si es necesario, ir al lugar para realizar una investigación en la cual, en algunas ocasiones, es necesario contactar a organismos reguladores locales para resolver el problema de interferencia.

La relación entre TDOA y FDOA provoca que se tengan variaciones tanto espaciales como temporales. Esto quiere decir que, para el caso de las variaciones temporales, una geolocalización no dará el mismo resultado si se realiza en el día que en la noche, además de que hay la posibilidad de caer en lo que se denomina como “tiempos ciegos” en los cuales la geolocalización no se pueda llevar a cabo, efecto provocado por la geometría de la Tierra y de los satélites en conjunto con las estaciones de monitoreo. En cuanto a las variaciones espaciales, se dan debido a que la Tierra y los satélites están en movimiento, por lo que las distancias suelen ser distintas en cada momento. Se puede dar el caso de tener un “espacio ciego”, esto es, cuando el transmisor al que se intenta geolocalizar se ubica en el horizonte o muy cercano a este, lo que provoca que alguno de los satélites no pueda ubicarlo y, por lo tanto, no se realice el proceso como se desea.

Una vez analizadas las tres técnicas principales para la geolocalización de transmisores, es importante concluir que, tanto FDOA como TDOA tienen sus ventajas y desventajas, por ello FDOA/TDOA logra un completo análisis, siendo el tiempo de procesamiento la única variante que depende del tipo de portadora (modulada o no modulada), así como su técnica de acceso (TDMA, FDMA, CDMA, etc.). Para saber que técnica utilizar, es importante conocer qué tipo de interferencias se presentan con frecuencia, los recursos con que se cuenta y la posibilidad de implementar sistemas más robustos tanto de detección como de procesamiento.

Conclusiones

De lo desarrollado en este trabajo se puede concluir que:

- Los sistemas de comunicación satelital están en continuo crecimiento, lo que ha provocado que se tengan que emplear tecnologías más avanzadas debido a la necesidad de optimizar el recurso escaso de la órbita geoestacionaria.
- La migración a bandas de frecuencia más altas es una de las soluciones para la optimización de la órbita geoestacionaria. La banda Ka ya se utiliza en la actualidad pero aun tiene mucho potencial para poder utilizarse como hoy en día se hace con las bandas C y Ku, la diferencia es que requiere mucha más potencia que éstas. Además se tienen investigaciones para banda Q/V teniendo como mayor reto, superar los problemas de atenuación y efectos climatológicos que a medida que aumenta la frecuencia se presentan con mayor fuerza y el requerimiento en potencia que es mayor, inclusive, que banda Ka.
- Para poder innovar, es necesario conocer los sistemas satelitales a fondo, tanto en la parte terrestre, como en la parte espacial y saber en qué forma interactúan, además del medio de transmisión por el que se desplazan las ondas electromagnéticas.
- La mayoría de los casos de interferencia que se tienen en los sistemas satelitales son provocados dentro del mismo. El mal uso del equipo transmisor, problemas en la coordinación, defectos en el sistema son ejemplos de ello. Por ello se recomienda tener políticas de uso internas y capacitación en calidad. En la medida en que se tomen medidas preventivas a tiempo, se podrán evitar la mayoría de estos casos que, por lo general, solo afectan a la red satelital en que se presentan.
- Todo amplificador de potencia debe de operarse en región lineal para evitar problemas de intermodulación, ruido de fase, etc. Y en dado caso de estar utilizando configuraciones con multiportadoras, se debe trabajar en regiones por debajo del punto de saturación.
- Se deben tomar en consideración las posibles interferencias de fuentes externas no satelitales. La interferencia solar es, inevitablemente, un problema presente que se tendrá que tomar en cuenta. Se recomienda que se tengan chequeos regulares de las conexiones y cableados de los sistemas terrestres, ya que pueden llegar a presentarse casos de inducción de otros sistemas de radiocomunicación.
- Los casos de interferencia que más afectan al óptimo uso del espectro radioeléctrico en sistemas satelitales son las generadas por otros sistemas satelitales. Por suerte, hoy en día, se tienen agentes reguladores que marcan la pauta y hacen lo posible por evitar este tipo de afectaciones.

-
- Las antenas, con el paso del tiempo, han ido disminuyendo de tamaño, lo que ha generado más casos de interferencias, debido al ensanchamiento del patrón de radiación, por lo que es muy importante seguir las recomendaciones de la UIT en el diseño de las antenas.
 - La no homogeneidad de las redes satelitales ha impedido que la separación entre satélites sea aún de 2° y en ciertas regiones de 1.9° . A pesar del desarrollo de nuevas técnicas de acceso y de la migración de redes de banda C a Ku y de banda Ku a Ka.
 - Los sistemas de Geolocalización son fundamentales para la erradicación de interferencias intencionales y errores en el uso de estaciones terrenas. La interferometría es, hoy en día, la técnica más eficaz para la detección de transmisores terrestres y tiene aún mucha posibilidad de desarrollo.
 - Para complementar este trabajo sería importante realizar una investigación de las técnicas de acceso más nuevas, de modulación y codificación, además de cuestiones regulatorias que permiten un uso eficaz del espectro radioeléctrico. Esto con el fin de ampliar el panorama sobre el tema de las interferencias en satélites geoestacionarios.
 - Este trabajo me ha permitido desarrollar una mayor afinidad con los sistemas de comunicación satelital y me servirá de base para continuar adquiriendo conocimientos en el área de las radiocomunicaciones. Considero que el estudio de las interferencias es muy importante para el desarrollo de sistemas con mayor resistencia a estos efectos, tanto para aquellos sistemas satelitales utilizados en el servicio fijo, como también para aquellos utilizados en servicios móviles, que han comenzado a desarrollarse de forma considerable pero que aún tienen mucho que avanzar, a diferencia de los sistemas fijos por satélite que han disminuido su desarrollo debido a limitaciones técnicas que requieren de soluciones más complejas y novedosas, pero no imposibles.

Apéndice

Programa desarrollado en Matlab para obtener el patrón de radiación (Figuras 7-4 y 7-5) de una antena parabólica con la frecuencia de operación y el diámetro de la antena como datos de entrada:

```
F=input('Cual es la frecuencia de operación en GHz de la antena: ');
D=input('Cual es el diámetro, en metros, de la antena: ');
LO=(3*(10^8))/(F*(10^9));

Gmax=10*log10((0.7)*(((3.141594*D)/LO)^2));
Gi=-1+15*log10(D/LO);
angmin=(20*LO)/D)*sqrt(Gmax-Gi);
b=(2.5*(10^(-3)))*(D/LO)^2;

ang=-90;
i=0;
while ang<=90
i=i+1;
if abs(ang)<angmin
    G(i)=Gmax-b*(ang^2);

elseif abs(ang)<=19.95
    if Gi<(29-25*log10(ang))
        G(i)=Gi;
    else
        G(i)=29-25*log10(ang);
    end
else
    if -3.5<(32-25*log10(ang))
        G(i)=-3.5;
    else
        if -10>(32-25*log10(ang))
            G(i)=-10;
        else
            G(i)=(32-25*log10(ang));
        end
    end
end
end
A(i)=ang;
ang=ang+0.001;

end

figure(1)
hold on
plot(A,G)
axis([-90 90 -20 70]);
title('Patrón de radiación');

figure(2)
hold on
plot(A,G)
axis([-2 2 -20 70]);
```

Referencias Bibliográficas

LIBROS

DAVIDOFF, Martin R., *The Satellite Experimenter's Handbook*, The American Radio Relay League, Estados Unidos de América, 1990.

ELBERT, Bruce R., *The Satellite Communication Applications Handbook*, Segunda Edición, Artech House Space Technology and Applications Series, Estados Unidos de América, 2004.

EVANS, B. G., *Satellite Communication Systems*, Tercera Edición, The Institution of Electrical Engineers, Reino Unido, 1999.

FREEMAN, Roger L., *Radio System Design For Telecommunications (1-100 GHz)*, Estados Unidos de América, 1987.

HA, Tri T., *Digital Satellite Communications*, Segunda Edición, McGraw-Hill, Singapur, 1990.

MARAL, Gérard / BOUSQUET, Michel, *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technologies*, Quinta Edición, Wiley, Reino Unido, 2009.

NERI, Rodolfo, *Comunicaciones por Satélite*, Thomson Editores, México, 2003.

RODDY, Dennis, *Satellite Communications*, Tercera Edición, McGraw-Hill, Estados Unidos de América, 2001.

ROSADO, Carlos, *Comunicación por Satélite: Principios, Tecnologías y Sistemas*, Grupo Noriega Editores, México, 1995.

PUBLICACIONES DE LA UIT Y RECOMENDACIONES DE LA UIT-R

Handbook on Satellite Communications, Tercera Edición, Wiley Interscience, Estados Unidos de América, 2002.

Reglamento de Radiocomunicaciones, Edición 2008.

UIT-R P.452-14, *Procedimiento de Predicción para Evaluar la Interferencia Entre Estaciones Situadas en la Superficie de la Tierra a Frecuencias Superiores a Unos 0.1 GHz*, 2010

UIT-R P.618-10, *Datos de Propagación y Métodos de Predicción Necesarios para el Diseño de Sistemas de Telecomunicación Tierra-Espacio*, 2009

UIT-R S.465-6, *Diagrama de Radioación de Referencia de Estación Terrena para Utilizar en la Coordinación y Evaluación de las Interferencias, en la Gama de Frecuencias Comprendidas entre 2 y unos 31 GHz*, 2010.

UIT-R S.484-3, *Mantenimiento de la Posición en Longitud de los Satélites Geoestacionarios del Servicio Fijo por Satélite*, 1992.

UIT-R S.580-6, *Diagramas de Radiación que han de Utilizarse como Objetivo de Diseño para las Antenas de las Estaciones Terrenas que Funcionan con Satélites Geoestacionarios*, 2003.

UIT-R S.725, *Características Técnicas de los Terminales de Muy Pequeña Apertura (VSAT)*, 1992.

UIT-R S.1064-1, *La Precisión de Puntería como Objetivo de Diseño para las Antenas Dirigidas a la Tierra a Bordo de Satélites Geoestacionarios del Servicio Fijo por Satélite*, 1995.

UIT-R SF.1707, *Métodos para Facilitar la Implementación de un Gran Número de Estaciones Terrenas del Servicio Fijo por Satélite en Zonas en las que También Están Instalados Servicios Terrenales*, 2005.

ARTICULOS TECNICOS

BARDELLI, R. / CLEMENT, T. / HAWORTH, D. P. / SMITH, N. G., *Interference Localization For EUTELSAT Satellites - The First European Transmitter Location System*, John Wiley & Sons, 1997.

BOLEA-ALAMAÑAC, Ana / BOUSQUET, Michel / CASTANET, Laurent, *Interference And Fade Mitigation Techniques For Ka And Q/V Band Satellite Communication Systems*.

BURROWS, Michael L., *Closer Spacing Of Geostationary Satellites Through Adaptive Nulling At The Ground Terminal*, IEEE, Julio 1987.

FILIPI, Cesar, *Baseband Performance Degradation Due To Interference In The Fixed-Satellite Service*, National Telecommunications and Information Administration, Estados Unidos de América, 1986.

HULT, John L. / REINHART, Edward E., *Satellite Spacing and Frequency Sharing For Communication and Broadcast Services*, IEEE, Febrero 1971.

JERUCHIM, Michel C., *A Survey Of Interference Problems And Applications To Geostationary Satellite Networks*, IEEE, Marzo 1977.

KIM, Sooyoung, *A Study On The Separation Distance For Frequency Sharing Between GSO Network And Terrestrial Network In Ka Band*, República de Corea, 2005.

LEGHARI, Zulfiqar A., *Detailed Interference And Compatibility Analysis Of Two GEO Satellites Located At 1° Orbital Separation*, Faculty Electronic & Computer Engineering KUTK, Malasia, 2005.

MANOHAR, R. / ROY, M. N., *Available Link Isolation Between Geostationary Satellite Systems*, TELSIS, Yugoslavia, Octubre 1999.

MEDINA, Mario Arturo, *Interferencias Comunes En Las Comunicaciones Vía Satélite*, Facultad de Estudios Superiores Aragón UNAM, 2006.

STEFFES, Paul G. / SMITH, William W., *Time Delay Techniques For Satellite Interference Location System*, IEEE, 1989.

WEISS, Hans J., *Relating To The Efficiency Of Utilization Of The Geostationary Orbit/Spectrum In The Fixed-Satellite Service*, IEEE, Diciembre 1980.