

01170



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

INVESTIGACION TEORICO / PRACTICA SOBRE
TECNOLOGIA SATELITAL CON ENFOQUE
DIDACTICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA ELECTRICA
(AREA DE TELECOMUNICACIONES)

P R E S E N T A

ING JUAN FERNANDO SOLORZANO PALOMARES

DIRECTOR DE TESIS
DR. SALVADOR LANDEROS AYALA



MEXICO, D. F.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Faint, illegible text at the bottom of the page, possibly bleed-through from the reverse side or a stamp.

D e d i c o

E s t a t e s i s

A m i e s p o s a e h i j o s

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: JUAN FERNANDO
SOLORZANO PALOMARES

FECHA: 31 AGOSTO / 2004

FIRMA: 

INVESTIGACIÓN TEÓRICO/PRÁCTICA SOBRE TECNOLOGÍA SATELITAL CON ENFOQUE DIDÁCTICO

A) CONTENIDOS:

- OBJETIVOS
- MARCO TEÓRICO: PANORAMA DE LA TECNOLOGIA SATELITAL ACTUAL. ANÁLISIS. CÁLCULO DEL ENLACE GEOESTACIONARIO.
- RESULTADOS Y CONCLUSIONES
- ANEXOS

B) DESARROLLO DEL MARCO TEÓRICO:

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 DENOMINACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	1
1.1.1 LAS COMUNICACIONES EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA . . .	2
1.2 BANDAS EMPLEADAS EN LAS TELECOMUNICACIONES	3
1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SERVICIOS EN TELECOMUNICACIONES	4
1.3 DEFINICIÓN DE UN SATÉLITE PARA TELECOMUNICACIONES . . .	4
1.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ÓRBITA	6
1.4 APLICACIONES O PRINCIPALES USOS DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN VIA SATÉLITE	8
1.4.1 SISTEMAS DE DIFUSIÓN DIRECTA AL HOGAR, T.V.	10
1.4.2 SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN GLOBAL Y AYUDA EN CASO DE DESASTRES	11
1.4.3 COMPLEMENTO DE LAS REDES TERRESTRES	12
1.4.4 APOYO PARA INVESTIGACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS	12
1.4.5 COMUNICACIONES MILITARES, CONTROL Y DEFENSA DE LA SOBERANÍA NACIONAL	14
1.4.6 COMUNICACIÓN INMEDIATA DE NOTICIAS Y EVENTOS . . .	14
CAPÍTULO 2 DESCRIPCIÓN GENÉRICA DE UN SISTEMA SATELITAL . .	16
2.1 SEGMENTOS	16
2.1.1 COMPONENTES OPERATIVOS DE LA ESTACIÓN TERRENA (USUARIOS)	17
2.1.2 SEGMENTO ESPACIAL	19

2.1.2.1	SEGMENTO ESPACIAL EN TIERRA	19
2.1.2.2	SEGMENTO ESPACIAL EN ÓRBITA	20
2.1.2.2.1	SUBSISTEMAS DEL SATÉLITE	21
2.1.2.2.1.1	SUBSISTEMA DE COMUNICACIONES/ANTENAS	22
2.1.2.2.1.2	SUBSISTEMA DE COMUNICACIONES/REPETIDORES	35
2.1.2.2.1.3	SUBSISTEMA DE ORIENTACIÓN, ÓRBITA	38
2.1.2.2.1.4	SUBSISTEMA DE PROPULSIÓN	42
2.1.2.2.1.5	SUBSISTEMA DE CONTROL TÉRMICO	44
2.1.2.2.1.6	SUBSISTEMA DE TELEMETRÍA, COMANDO Y RANGO	45
2.1.2.2.1.7	SUBSISTEMA DE ENERGÍA ELÉCTRICA	47
2.1.2.2.1.8	SUBSISTEMA ESTRUCTURAL	54
2.1.2.2.1.9	PRUEBAS DE CALIFICACIÓN ESPACIAL	55
2.1.2.2.1.9	PROTOTIPOS O MODELOS PARA CALIFICACIÓN ESPACIAL	55
2.2	TIPOS DE ÓRBITAS	56
2.2.1	CIRCULAR INCLINADA	59
2.2.1.1	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SISTEMA GPS	62
2.2.2	ELÍPTICA INCLINADA	64
2.2.3	CIRCULAR POLAR	65
2.2.4	GEOESTACIONARIA	66
2.3	POSICIONAMIENTO EN ÓRBITA DE SATÉLITES GEOESTACIONARIOS	67
2.4	TENDENCIAS AL FUTURO	71
2.5	SISTEMAS LEOS/MEOS CONTRA GEOS	72
2.6	SISTEMAS GEOS CONTRA LEOS/MEOS	72
2.7	CENTROS DE LANZAMIENTO DE SATÉLITES	73
2.7.1	CENTROS DE LANZAMIENTO DE SATÉLITES EN EL CONTINENTE AMERICANO	75

2.7.2 CENTROS DE LANZAMIENTO DE SATÉLITES EN AUSTRALIA, INDIA Y SUDÁFRICA	75
2.7.3 CENTROS DE LANZAMIENTO DE SATÉLITES EN EL EUROPA RUSIA, JAPÓN Y CHINA	76
2.8 TÉCNICAS DE MULTIPLEXAJE, MODULACIÓN Y ACCESO AL SATÉLITE GEOESTACIONARIO PARA LA DIFUSIÓN DE LA INFORMACIÓN	77
2.8.1 MULTIPLEXAJE, MODULACIÓN Y ACCESO AL SATÉLITE. . .	77
2.8.1.1 MULTIPLEXAJE	78
2.8.1.2 MODULACIÓN	79
2.8.1.3 TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE AL SATÉLITE.	79
2.8.1.3.1 PRINCIPALES PROTOCOLOS DE ACCESO ALEATORIO	81
2.8.1.3.2 ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA . .	86
2.8.1.3.3 ACCESO MÚLTIPLE POR PORTADORA EN BANDA LATERAL ÚNICA COMPANDIDA (CSSB SYSTEMS)	87
2.8.1.3.4 ACCESO MÚLTIPLE POR PORTADORA SCPC	88
2.8.1.3.5 ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE TIEMPO	88
2.8.1.3.6 ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO	90
2.8.1.3.6.1 CDMA CON SALTO DE FRECUENCIA	93
2.8.1.3.6.2 CDMA CON SALTO DE TIEMPO	95
2.8.1.3.6.3 CDMA CON CHIRP	95
2.8.1.3.7 COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ACCESO	98
2.8.1.3.7.1 VENTAJAS DEL USO DE FDMA	98
2.8.1.3.7.2 DESVENTAJAS DE FDMA	98
2.8.1.3.7.3 VENTAJAS DE TDMA	100
2.8.1.3.7.4 DESVENTAJAS DE TDMA	101
2.8.1.3.7.5 VENTAJAS DE CDMA	101
2.8.1.3.7.6 DESVENTAJAS DE CDMA	102
2.9 RESUMEN DE TÉCNICAS DE ACCESO ALEATORIO A LOS CANALES DEL SATÉLITE	103

CAPÍTULO 3	LAS COMUNICACIONES SATÉLITALES EN MÉXICO . . .	104
3.1	ANTECEDENTES BÁSICOS	104
3.2	LAS COMUNICACIONES SATÉLITALES EN MÉXICO.	106
3.3	SATÉLITES MEXICANOS EN OPERACIÓN	111
3.3.1	CARACTERÍSTICAS DEL SUBSISTEMA DE COMUNICACIONES DEL SATÉLITE SOLIDARIDAD 2	115
3.3.1.1	BANDA C EN EL SOLIDARIDAD 2	115
3.3.1.2	BANDA Ku EN EL SOLIDARIDAD 2	117
3.3.1.3	BANDA L EN EL SOLIDARIDAD 2	118
3.4	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SATMEX V, VI . .	120
3.4.1	CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DEL SATMEX V . .	121
3.4.2	CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DEL SATMEX VI . .	125
CAPÍTULO 4	LA ATMÓSFERA Y SU IMPACTO EN LAS TELECOMUNICACIONES	134
4.1	DINÁMICA ATMOSFÉRICA	134
4.2	DESCRIPCIÓN DE LAS CAPAS DE LA ATMÓSFERA	135
4.2.1	TELECOMUNICACIONES A TRAVÉS DE LA TROPÓSFERA Y DE LA IONÓSFERA	137
4.2.1.1	IMPORTANCIA DE LA IONÓSFERA EN LAS TELECOMUNICACIONES	140
4.3	FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS QUE AFECTAN LAS SEÑALES	143
4.3.1	PARÁMETROS DE LA SEÑAL Y FENÓMENOS QUE LOS AFECTAN	144
4.3.2	CAPAS ATMOSFÉRICAS QUE IMPACTAN A LAS MICROONDAS Y PRINCIPALES PROBLEMAS GENERADOS	145
4.4	ATENUACIÓN EN SEÑALES SATELITALES	145
4.4.1	ATENUACIÓN POR ABSORCIÓN	146
4.4.2	ATENUACIÓN POR HIDROMETEOROS Y LLUVIA	147
4.4.3	ATENUACIÓN POR PÉRDIDAS ENTRE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO SATELITAL	149

4.5	DESPOLARIZACIÓN EN LOS ENLACES SATELITALES	150
4.5.1	ATENUACIÓN Y DESPOLARIZACIÓN DEBIDA A COMPONENTES ATMOSFÉRICOS Y ELECTRONES DE LA IONÓSFERA	152
4.5.2	CAUSAS Y CARACTERÍSTICAS DE LA DESPOLARIZACIÓN DE LAS SEÑALES	154
4.6	ROTACIÓN DE FARADAY	155
4.7	RETARDO DE GRUPO	156
4.8	DISPERSIÓN Y CINTILACIÓN EN EL ENLACE SATELITAL	157
4.9	REFRACCIÓN EN LA ATMÓSFERA	158
4.10	RUIDO EN LA RECEPCIÓN	159
4.10.1	RUIDO PRODUCIDO POR LOS AMPLIFICADORES DE RADIOFRECUENCIA	162
4.10.1.1	PRINCIPALES AMPLIFICADORES DE BAJO RUIDO (ABR'S O LNA'S)	163
4.10.2	PRINCIPALES FUENTES DE RUIDO EN EL EQUIPO RECEPTOR	163
4.11	COHERENCIA EN EL ANCHO DE BANDA	164
4.12	RESUMEN DE PROBLEMAS DE ATENUACIÓN EN UN ENLACE	165
CAPITULO 5.0 MODELOS MATEMÁTICOS PARA CÁLCULO DE ATENUACIÓN POR LLUVIA		166
5.1	MODELO DE CRANE	168
5.2	MODELO CCIR	175
5.2.1	METODO 1 (1986)	176
5.2.2	METODO 1 (1990)	178
5.3	MODELO SAM	180
5.4	MODELO DAH	182

5.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN BANDA Ku CON ALGUNOS MODELOS	185
5.5.1 CÁLCULO PRÁCTICO CON EL MODELO CRANE	185
5.5.2 CÁLCULO PRÁCTICO CON EL MODELO CCIR DE 1990 ...	187
5.5.3 CÁLCULO PRÁCTICO CON EL MODELO SAM	188
5.5.4 CÁLCULO PRÁCTICO CON EL MODELO DAH	189
5.5.5 TABLA RESUMEN, CONCLUSIONES Y COMENTARIOS ...	191
CAPITULO 6.0 ANÁLISIS TEÓRICO DEL ENLACE CON EL SATÉLITE GEOESTACIONARIO	193
6.1 ETAPAS GENERALES PARA EL DISEÑO DEL ENLACE	193
6.2 CONSIDERACIONES GENERALES DEL ENLACE	195
6.3 CÁLCULOS PRELIMINARES: ACIMUT, ELEVACIÓN Y DISTANCIA SATELITAL	196
6.3.1 ACIMUT	196
6.3.2 ELEVACIÓN	199
6.3.3 COBERTURA Y DISTANCIA SATELITAL	202
6.3.4 DECLINACIÓN MAGNÉTICA	206
6.3.5 ORIENTACIÓN DE ANTENAS UTILIZANDO UN ANALIZADOR DE ESPECTROS	210
6.4 CONSIDERACIONES GENERALES DEL ANÁLISIS DEL ENLACE	211
6.4.1 PROBLEMAS EN LA TRAYECTORIA	211
6.4.1.1 ATENUACIÓN DE LA SEÑAL EN LOS EQUIPOS	211
6.4.1.2 PÉRDIDAS EN LA ATMÓSFERA	212
6.5 OBTENCIÓN DE LA EXPRESIÓN DE LA TRAYECTORIA	212
6.5.1 PÉRDIDAS POR VIAJAR EN EL ESPACIO LIBRE	212
6.5.2 PÉRDIDAS TOTALES AL ATRAVESAR LA ATMÓSFERA ...	215
6.6 PROBLEMAS POR INTERMODULACIÓN E INTERFERENCIAS .	220
6.6.1 PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN POR INTERMODULACIÓN	220

6.6.2	PROBLEMAS POR INTERFERENCIAS	223
6.7	CALIDAD DE LA RECEPCIÓN SATELITAL	226
6.7	CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE FLUJO DE SATURACIÓN DEL SATÉLITE (DFS)	228
6.8	RESUMEN DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS EN LA TRAYECTORIA	229
6.9	CÁLCULO PRÁCTICO DE UN ENLACE ENTRE DOS LOCALIDADES	231
6.9.1	CONSIDERACIONES GENERALES	231
6.9.2	DATOS DE LAS ESTACIONES TERRENAS Y DEL SATMEX V	232
6.10	CÁLCULOS PRELIMINARES: ACIMUT, ELEVACIÓN Y DISTANCIA AL SATÉLITE	234
6.10.1	ACIMUT	234
6.10.2	DECLINACIÓN MAGNÉTICA	234
6.10.3	ELEVACIÓN DE LA ANTENA	234
6.10.4	DISTANCIA AL SATÉLITE	237
6.11	ENLACE DE LA ESTACIÓN TERRENA TRANSMISORA AL SATÉLITE	238
6.11.1	CÁLCULO DE C/N ASCENDENTE SIN INTERFERENCIAS	239
6.11.2	CÁLCULO DE C/N ASCENDENTE CON INTERFERENCIAS	242
6.12	ENLACE DEL SATÉLITE A LA ESTACIÓN TERRENA RECEPTORA	244
6.12.1	PORTADORA/RUIDO DESCENDENTE SIN INTERFERENCIAS	245
6.12.2	PORTADORA/RUIDO TOTAL DESCENDENTE	247
6.13	CÁLCULO DEL MÁRGEN DEL ENLACE	250
6.14	POTENCIA CONSUMIDA POR PORTADORA EN EL SATÉLITE	251
6.15	POTENCIA CONSUMIDA POR PORTADORA EN EL HPA	252
6.16	POTENCIA CONSUMIDA EN EL HPA DE LA ESTACIÓN MAESTRA	252

6.1.7 RESÚMEN DE METODOLOGÍ AS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL ENLACE	252
RESULTADOS Y CONCLUSIONES	253
● A) SOBRE EL CONTENIDO DEL MARCO TEÓRICO	254
● B) RESPECTO A LA INSTALACIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN DEL ENLACE GEOESTACIONARIO	255
● C) PRUEBAS REALIZADAS CON EL EQUIPO Y ANTENA DE 3.8 m	258
● D) COMENTARIOS RESPECTO A LOS MODELOS PARA CÁLCULO DE ATENUACIÓN POR LLUVIA	259
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	260
APÉNDICE A: PROYECTO DE SALA DE VIDEOCONFERENCIAS	264
APÉNDICE B: INSTALACIÓN DE ANTENAS Y EQUIPOS SATELITALES .	269
B CARACTERISTICAS PARA LAS ANTENAS Y EQUIPOS SATELITALES	270
B.1 CONSIDERACIONES GENERALES	270
B.2 ESPECIFICACIONES PARA EL CABLEADO ELÉCTRICO	271
B.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE LA ANTENA	272
B.4 DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES DE LA ESTACIÓN TERRENA	273
B.4.1 OPERACION DEL TRANSCEIVER	273
B.4.2 GENERALIDADES	273
B.4.3 CONTROL DE POTENCIA DE TRANSMISIÓN	273
B.4.4 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA	274
B.4.4.1 DESCRIPCIÓN DE CIRCUITOS	274
B.4.4.1.1 DESCRIPCION DE MODULOS	276
B.4.4.1.2 OSCILADOR DE REFERENCIA (MÓDULO G)	277
B.4.4.1.1.3 DOWNCONVERTER DE BAJO RUIDO (MÓDULO H) ..	277
B.4.4.1.1.4 SINTETIZADOR DE BANDA L (MÓDULO B)	278

B.4.4.1.1.5 AMPLIFICADOR DE ESTADO SÓLIDO (MÓDULO J)	278
B.4.4.1.1.5 SINTETIZADOR DE 1 Ghz, OSCILADOR PLL DE 3.3 Ghz Y UPCONVERTER DE 4GHz (MÓDULOS D,E,M)	278
B.4.5 MODEM SATELITAL	279
B.4.5.1 DEMODULADOR	280
B.4.5.2 CIRCUITERIA DE INTERFASE	282
B.4. 6 PROCESADOR	283
B.4.7 CIRCUITERIA ADICIONAL	284
B.5 GENERALIDADES DEL MULTIPLEXOR	286
B.5.1 MANEJO DE TRÁFICO SÍNCRONO O ASÍNCRONO EN EL MULTIPLEXOR	288
B.5.1.1 TARJETA XP4 - 3	288
B.5.1.2 PAD ASÍNCRONO Y SÍNCRONO DEL MULTIPLEXOR	288
B.5.1.3 TARJETAS XP4 - 2	288
B.5.1.4 TARJETAS XP8 -2	288
B.6 INSTALACIÓN DEL SOFTWARE DE CONTROL DE LA ESTACIÓN	289

INVESTIGACIÓN TEÓRICO/PRÁCTICA SOBRE TECNOLOGÍA SATELITAL CON ENFOQUE DIDÁCTICO

OBJETIVOS:

- Realizar una investigación que muestre lo más importante de la tecnología satelital actual y, que la información conforme un texto de apoyo a la impartición de clases, presentado de manera original, mediante imágenes, cuadros sinópticos, tablas y resúmenes (un enfoque didáctico).
- Contar con un enlace satelital geoestacionario que permita la experimentación, comprobación de valores obtenidos con los modelos de atenuación y la medición/comprobación de diversos parámetros relativos a un enlace.
- Contar con infraestructura de apoyo a la realización de prácticas de los alumnos de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, educación a distancia y, difusión de cursos, así como para realizar videoconferencias vía satélite.

El continuo desarrollo de las Telecomunicaciones, ha propiciado la consolidación de diversas tecnologías, tanto para las comunicaciones guiadas como para las no guiadas. Entre estas últimas, la "Tecnología satelital" ha recibido un fuerte impulso desde finales del siglo pasado y se ha posicionado como elemento primordial para el desarrollo de las telecomunicaciones a nivel mundial.

En los enlaces a través de la atmósfera, las señales sufren los embates de los cambios climatológicos y la atenuación de la potencia transmitida depende fuertemente de la frecuencia empleada y de lo severo de la lluvia principalmente, pues conforme más alta la frecuencia, mayor es la atenuación.

Dado que la tendencia en las telecomunicaciones es el empleo de banda ancha, para envío de gran cantidad de datos y comunicaciones

tipo multimedia, surge la necesidad de emplear frecuencias de decenas de gigahertz, con el consiguiente aumento en la atenuación bajo condiciones de lluvia.

Para enfrentar adecuadamente los problemas de atenuación, se han desarrollado diversos modelos para predecir su valor y emplearlo en los cálculos de los enlaces via satélite, sin embargo, hay fuerte discrepancia entre los resultados calculados con ellos y los resultados medidos en algunos casos, por ello es necesario revisarlos compararlos y adecuarlos al entorno particular pues los modelos han sido elaborados para su uso en países desarrollados.

Al inicio del borrador de esta tesis, finales del año 2000, sólo los países desarrollados contaban con cartas de atenuación calculadas específicamente con base en datos propios (por ejemplo Estados Unidos, Europa en general y Japón); en otros países muchas cartas disponibles han sido extrapoladas; México no fue la excepción pues algunas de las cartas disponibles han sido obtenidas de esa manera, por lo que es conveniente recolectar de forma cíclica los datos pluviométricos en los períodos cortos que más afectan las señales de algunas de las regiones, para formar con ellos una base de datos que alimente tanto los diversos modelos de atenuación pluviométrica, de señales de microondas para, en principio validarlos, modificarlos/adaptarlos a las distintas zonas de nuestro país o, en caso necesario, agregar particularidades por cada zona climática o regiones y comprobar/generar los márgenes de atenuación propios de las regiones del país, pues la extrapolación de cartas a partir de mediciones de otros países no es totalmente adecuada. Cada región del planeta tiene sus características particulares que la hacen diferente en mayor o menor medida, de regiones similares. Como hemos observado para México en la época de lluvias, existen cambios en el comportamiento climatológico, a veces en zonas separadas tan sólo 100 km. por lo que es importante para el cálculo de los enlaces satelitales contar con la información estadística relevante de los períodos cortos lluviosos que más afectan a las comunicaciones satelitales (clasificada por días, horas o incluso

hasta por minutos si fuera el caso), preferentemente que la información acumulada por períodos largos que no son adecuados para prever la peor condición fortuita de una zona dada, para el cálculo del enlace satelital que garantice una disponibilidad específica, pues la severidad de la atenuación y despolarización depende de lo fuerte de la lluvia y no del total de lluvia acumulada (sin embargo se emplea la tasa de acumulación, comúnmente en mm/hr.). Además, con un enlace completo vía satélite, puede comprobarse de manera práctica: los cálculos del enlace, retardos de la señal, densidades de interferencias diversas, obtener patrones de radiación de la antena, prácticas de orientación de la antena hacia algún satélite geoestacionario, etc.

La publicación de textos sobre tecnología satelital en México es escasa y se cuenta solo con unos cuantos autores, de ahí que sea conveniente el promover la publicación de textos sobre este tema, con el fin de enriquecer, en la medida de lo posible, las fuentes de conocimiento sobre el tema en el país.

Para la Facultad de Ingeniería es conveniente contar con estaciones terrenas en banda Ku, para contactar con diversas universidades y establecer programas de intercambio y de educación a distancia, tanto en licenciatura en posgrado, además de permitir relaciones con centros de investigación y/o cultura que cuenten con una estación terrena en banda ku para llevar a cabo programas de intercambio de información vía satélite.

Complementando lo anterior, se propone también la construcción de una sala de videoconferencia en la parte posterior del edificio Valdés Vallejo con capacidad de 50 personas para establecer programas de colaboración con la División de Educación continua de la Facultad para la difusión vía videoconferencia de sus cursos y difusión de los cursos de posgrado, con respaldo vía satélite.

Para realizar los objetivos planteados al inicio de esta introducción, se realizó la instalación de un enlace satelital en banda Ku.

Con dicha infraestructura se podrá realizar experimentación académica, como puede ser:

- La medición práctica de medidas de atenuación por lluvia de las comunicaciones satelitales.
- Orientación de antena y comprobación de cálculos de enlace.
- Medición de diversos parámetros, como puede ser el tiempo de retardo, atenuación por distancia, etc.

Como fomento a la educación, se sugiere apoyar a la educación a distancia mediante videoconferencias vía satélite, así como la realización de prácticas diversas para los alumnos de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones.

Por consiguiente, desde un punto de vista didáctico/académico de divulgación este trabajo incluye, de forma breve, directa y con cuadros resúmenes la información básica de lo siguiente:

- El proyecto básico de la sala de videoconferencia a un lado del edificio Valdés Vallejo (primer anexo al documento).
- La información panorámica actualizada de la tecnología satelital, incluyendo el análisis y cálculo del enlace satelital geoestacionario.
- La comparación de los resultados obtenidos mediante los modelos de atenuación por lluvia más empleados en la actualidad, conclusiones y modificaciones sugeridas.
- Mediciones y prácticas realizadas con las estaciones terrenas.
- Un anexo sobre los detalles de instalación de las estaciones terrenas de la Facultad.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 DENOMINACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Desde el punto de vista de la Telecomunicaciones las ondas electromagnéticas se clasifican en bandas de frecuencias por decadas, ubicadas dentro del espectro electromagnético de acuerdo a las características de propagación observadas, que las denominan como bajas frecuencias, radiofrecuencias, microondas, luz, etc. Parte de ellas se agrupan en el denominado espectro radioeléctrico de la SCT.

Dependiendo de la frecuencia, una onda electromagnética que se propaga en la atmósfera sufrirá fenómenos diversos (difracción, refracción, despolarización, multitrayectorias, etc.), en función de las condiciones climáticas e hidrometeoros presentes en un momento dado. El alcance de la señal transmitida depende de la potencia empleada, las características del dispositivo de acoplamiento al medio que se emplea y, en el caso de la atmósfera, de que en su trayectoria confronte algunos de los fenómenos meteorológicos antes mencionados (Fig. 1.1).

La velocidad de una onda electromagnética en la atmósfera, depende del índice de refracción de las capas que atraviesa (el cual cambia con las turbulencias atmosféricas) y es, por consiguiente, siempre menor que la velocidad de la luz en el vacío. La fórmula que relaciona la frecuencia y la longitud de onda con la velocidad de propagación es la siguiente:

$$c = \lambda f \quad c \approx (3) \times (10^8) \frac{m}{seg} \quad [en \ el \ vacio] .$$

Una de las primeras clasificaciones de las ondas electromagnéticas consideró su frecuencia y la forma en que viajan en la atmósfera, según se indica en el cuadro sinóptico y figuras siguientes.

1.1.1 LAS COMUNICACIONES EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA DE PROPAGACIÓN

Ondas superficiales (< 30 MHz, 3 componentes)	<p>Onda directa</p> <hr/> <p>Onda reflejada en la tierra</p> <hr/> <p>Onda superficial</p>	AM, radioaficionados, radionavegación, servicios móviles
Ondas ionosféricas (De 3 a menos de 300 MHz.)	La onda se refleja en la ionosfera y continua saltando bajo ciertas condiciones atmosféricas.	FM, Radio y T.V. en HF, Servicios aeronáuticos y marinos móviles.
Ondas troposféricas (de 30 MHz a 300 MHz)	La región entre 10 y 20 km. de altitud dispersa la energía debido a las irregularidades del índice de refracción en la troposfera que produce una intensa fluctuación e interrupciones pero que, a pesar de todo, permite comunicaciones a gran distancia.	
Onda con propagación en línea recta o con línea de vista (de 3 GHz a frecs. ópticas).	Es imperante que haya una trayectoria a cielo despejado o libre pues incluso el oxígeno, el vapor de agua y lluvia absorben la energía de la señal en ciertas bandas. Se emplea en enlaces por microondas y satelitales.	

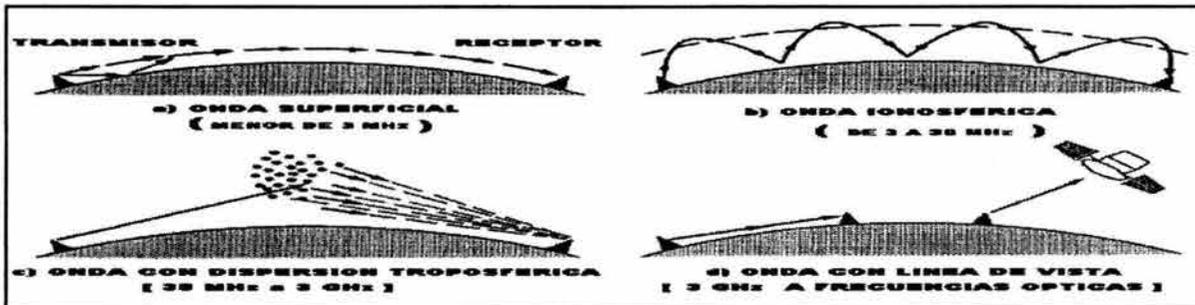


FIGURA 1.1 COMUNICACIONES A TRAVÉS DE LA ATMÓSFERA

1.2 BANDAS EMPLEADAS EN LAS TELECOMUNICACIONES

Los rangos de frecuencias en que es posible dividir el espectro reciben denominaciones específicas según el uso que se les ha dado, y el esquema general simplificado se indica en la tabla 4.1:

BANDA	ASIGNACIÓN	OBSERVACIONES
30 - 535 kHz	Comunicaciones marítimas y aeronáuticas	radiofrecuencias medias y bajas
535 - 1605	Radiodifusión	Radiodifusión en amplitud modulada
1605 - 30 MHz	Radioaficionados, banda civil, radiodifusión de onda corta o internacional, comunicaciones fijas y móviles, etc...	Aficionados, industrial científica y media, banda civil.
30 - 50 MHz	Gobierno y particular fijos y móviles	Policía, bomberos, forestal, servicios ferroviarios.
50 - 54 MHz	Aficionados	Banda de 6 metros.
54 - 72 MHz	Radiodifusión de T. V. (canales 2 y 4)	T.V. y servicios fijos y móviles
72 - 76 MHz	Servicios gubernamentales y no gubernamentales	Radiofaros aeronáuticos en 75 MHz
76 - 88 MHz	Radiodifusión de T. V. (canales 5 y 6)	T.V. y servicios fijos y móviles.
88 - 108 MHz	difusión de F. M.	F.M., facsímil.
108 - 122 MHz	Navegación aérea	Localizadores y control de aeropuertos.
122 - 174 MHz	Servicios fijos y móviles, aficionados	Aficionados en banda de 144 - 148 MHz.
174 - 216 MHz	Radiodifusión de T. V. (canales 7 y 13)	También servicios fijos y móviles.
216 - 470 Mhz	Aficionados, navegación aérea, banda civil	Radio altímetro, meteorología, VHF a partir de 300 MHz.
470 - 890 MHz	Radiodifusión de T.V.	canales 14 al 83.
890 - 3000 MHz	Radionavegación, aficionados.	Radar de 1300 a 1600 MHz.
3000 - 30,000 MHz	Aficionados y radionavegación	comunicaciones vía satélite, super altas frecuencias (SHF).
30,000 - 300,000 MHz	Experimental	Extraaltas frecuencias (EHF).

TABLA 4.1 BANDAS EMPLEADAS EN LAS TELECOMUNICACIONES

La diversidad de servicios que se observa a lo largo del espectro radioeléctrico, se resume con sus aplicaciones a continuación.

1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SERVICIOS EN TELECOMUNICACIONES

	- FIJOS	RADIOTELEFONÍA RADIOTELEGRAFÍA ENLACES PRIVADOS ENLACES CON MICROONDAS
	- MÓVIL TERRESTRE	RADIOCOMUNICACIÓN MÓVIL RADIOLOCALIZACIÓN BÚSQUEDA DE PERSONAS RADIOTELEFONÍA PRIVADA BANDA CIVIL
DESGLOSE DE LOS SERVICIOS	- MÓVIL AERONÁUTICO	CONTROL DEL TRÁNSITO AÉREO TELECOMUNICACIONES AERONÁUTICAS
	- MÓVIL MARÍTIMO	COMUNICACIONES COSTA - COSTA COMUNICACIONES CON BARCOS, ETC.
	- RADIODIFUSIÓN	AM, FM TELEVISIÓN EN VHF ,UHF

LOS ENLACES VÍA SATÉLITE SON EMPLEADOS EN LA MAYORÍA DE LOS SERVICIOS MENCIONADOS ANTERIORMENTE, INCLUYENDO SISTEMAS DE ACCESO DE ESPECTRO ESPARCIDO (CON MAYOR PRIVACIA Y/O SEGURIDAD)

1.3 DEFINICIÓN DE SATÉLITE PARA TELECOMUNICACIONES

Básicamente es un vehículo (o nave espacial) equipado con repetidores de microondas que orbita la tierra, generalmente a alturas mayores de 600 km., con la finalidad de prestar diversos servicios de

telecomunicaciones, meteorología e investigación. Los satélites más modernos también realizan enlaces intersatelitales mediante sistemas de comunicación ópticos o de repetidores de microondas (Fig 1.2).

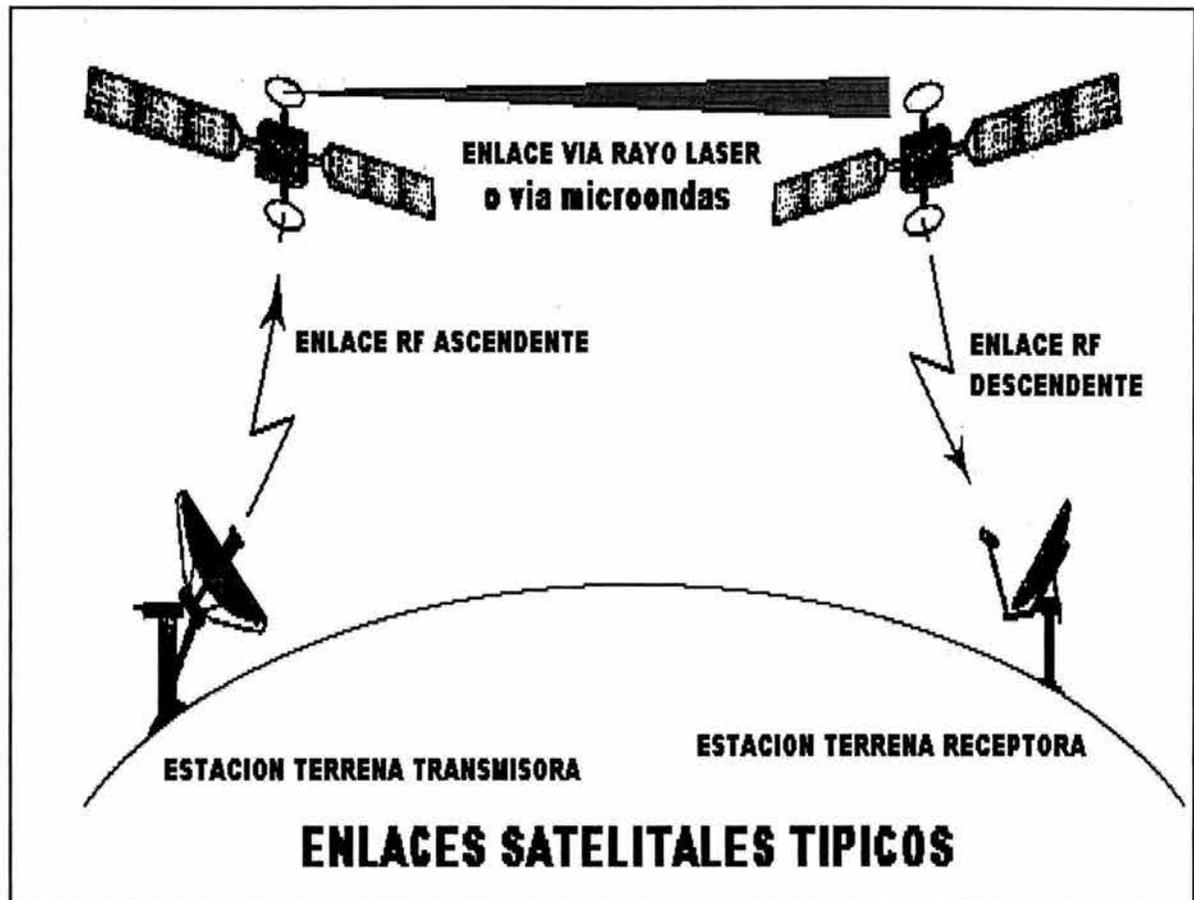


FIGURA 1.2 EL ENLACE SATELITAL GEOESTACIONARIO

Los repetidores de microondas de un satélite se denominan transpondedores, tienen anchos de banda fijos en pares de frecuencias preestablecidas para recibir y retransmitir las señales hacia otros satélites, o hacia la tierra con coberturas delimitadas regionalmente o intercontinentalmente.

1.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ÓRBITA

La órbita de un satélite obedece a las leyes de Kepler, astrónomo alemán que dedujo sus tres leyes observando y analizando el movimiento de los planetas alrededor del sol:

Su primera ley establece que las órbitas de los planetas (o satélites) son elipses con un centro gravitacional ubicado en uno de sus focos. En el caso de la órbita geoestacionaria, la elipse se degenera en un círculo con un radio de 42,242 km., y excentricidad 0.

$$r_o = a \left[\frac{1 - e^2}{1 + e \cos \phi_o} \right]$$

donde:

e = excentricidad, r_o = radio del foco a la órbita

ϕ_o = ángulo de la anomalía verdadera

(medido del perigeo a la posición instantánea el satélite)

La ecuación de la órbita se puede deducir a partir de la segunda ley de Newton y la ecuación de la fuerza gravitacional que actúa en el satélite; la ecuación resultante es una ecuación vectorial diferencial lineal de segundo orden, cuya solución proporciona seis constantes o parámetros orbitales, tres de ellos describen la forma de la elipse y la posición del satélite en órbita, los otros tres describen la orientación de la elipse con respecto a la rotación de la tierra.

$$F = \frac{GM_E m \dot{r}}{r^2}; \quad M_E = \text{masa de la tierra}; \quad \dot{r} = \text{vector unitario en dirección de } r$$

$$\text{donde: } GM_E = \mu = 3.986 \times 10^5 \frac{\text{km}^3}{\text{s}^2} = \text{constante de kepler}$$

$$G = 6.672 \times 10^{-11} \frac{\text{Nm}}{\text{kg}^2} = \text{constante gravitacional universal}$$

$$F = m \left[\frac{d^2 r}{dt^2} \right] \dot{r}; \quad m = \text{masa del satélite}$$

La segunda ley establece que los planetas barren áreas iguales en tiempos iguales, es decir que un satélite se mueve más rápido en su punto más cercano a la tierra o perigeo y más lento en su punto más alejado de la tierra o apogeo.

$$dA = 0.5 r_o^2 \left[\frac{d\phi_o}{dt} \right] dt = 0.5 h dt$$

Donde:

$$r_o^2 \left[\frac{d\phi_o}{dt} \right] = |h| = \text{magnitud del vector del momento angular del satélite}$$

h se vuelve constante si la órbita coincide con el plano ecuatorial

La tercera ley indica que el cuadrado del período orbital es proporcional al cubo del semieje mayor de la órbita.

$$T^2 = \left[\frac{4\pi^2 a^3}{\mu} \right]$$

donde:

$$\mu = \text{constante de Kepler} \approx 3.986 \times 10^5 \frac{km^3}{s^2}$$

Para las telecomunicaciones, se emplean:

- Satélites geoestacionarios.
- Constelaciones satelitales en órbitas bajas y medias.

Un satélite mantiene su órbita gracias a su velocidad, por ejemplo para alcanzar la órbita geoestacionaria requiere acelerarse hasta alcanzar 3070 m/seg., con un radio desde el centro de la tierra de 42,242 km. Éstos satélites se denominan así porque aparentemente están fijos para el observador en tierra.

Las primeras generaciones de satélites geoestacionarios de comunicaciones únicamente funcionaban como repetidores de

microondas, y simplemente cambiaban la frecuencia de recepción para retransmitir en una frecuencia menor (esto disminuye los problemas de interferencia entre la débil señal que recibe y la que retransmite).

Actualmente muchos satélites geoestacionarios son “inteligentes”, es decir, con capacidad de reproceso abordo de las señales recibidas antes de retransmitirlas y sus funciones básicas son las siguientes:

- Amplificar las señales recibidas.
- Demodularlas.
- En caso necesario conmutarlas en banda base.
- Modularlas y convertirlas a la frecuencia de bajada.
- Amplificarlas y retransmitirlas a su destino.

A pesar de su alto costo, los sistemas de comunicación vía satélite seguirán en uso, perfilándose hacia aplicaciones particulares de utilización y es obvio que no desaparecerán pues proveen enlaces adecuados en servicios específicos, complemento y respaldo de las redes terrestres en todo momento.

1.4 APLICACIONES O PRINCIPALES USOS DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN VÍA SATÉLITE

Las principales aplicaciones de los sistemas de comunicación vía satélite están en la cobertura de áreas de difícil acceso (con montañas, selvas o separados por desiertos y mares), donde no es costeable introducir servicios de comunicación guiados; asimismo en la radiodifusión directa de T.V.; además son necesarios para el desarrollo de la telefonía rural en zonas con baja densidad de población; actualmente complementan y expanden las redes terrestres de comunicación pues permiten la transmisión casi inmediata de diversos eventos culturales y recreativos (noticias, conciertos, olimpiadas, etc., a nivel global) sin que tenga que instalarse una gran infraestructura; también se utilizan para telefonía de larga distancia, Internet, manejo de tráfico diferido, redes corporativas y transmisión

de programas de educación a distancia (videoconferencias, telesecundaria, telemedicina, etc), así como para posicionamiento global, aplicaciones científicas y de tipo militar. Como ya se comentó, su última y más valiosa aplicación está como sistemas de respaldo a las redes terrestres para casos de emergencia y desastres.

A continuación se mencionan las bandas empleadas para las aplicaciones anteriormente mencionadas:

BANDAS EN LAS COMUNICACIONES SATELITALES

SATÉLITES GEOESTACIONARIOS	<p>L (1 - 2 GHz) $\lambda = 15 \text{ a } 30 \text{ cm.}$</p> <p>S (2 - 4 GHz) $\lambda = 7.5 \text{ a } 15 \text{ cm.}$</p> <p>C (4 - 8 GHz) $\lambda = 3.75 \text{ a } 7.5 \text{ cm.}$</p> <p>X (8 - 12 GHz) $\lambda = 2.42 \text{ a } 3.75 \text{ cm.}$</p> <p>Ku (12 - 18 GHz) $\lambda = 1.66 \text{ a } 2.42 \text{ cm.}$</p> <p>K (18 - 27 GHz) $\lambda = 1.11 \text{ a } 1.66 \text{ cm.}$</p> <p>Ka (27 - 40 GHz) $\lambda = 7.5 \text{ mm a } 1.11 \text{ cm.}$</p> <p>Milimétrica (40 - 300 GHz) $\lambda = 1 \text{ a } 7.5 \text{ mm.}$</p>
---------------------------------------	---

SATÉLITES DE ÓRBITAS BAJAS	Banda Ka
---------------------------------------	----------

Por consiguiente, en mi opinión las aplicaciones propias de los satélites están en:

- 1.4.1 • Los sistemas de "difusión directa al hogar" T.V., que incluirán las señales de alta definición con distribución de señales de televisión por cable, mensajería y video bajo demanda, así como radiodifusión comercial (fig. 1.3):

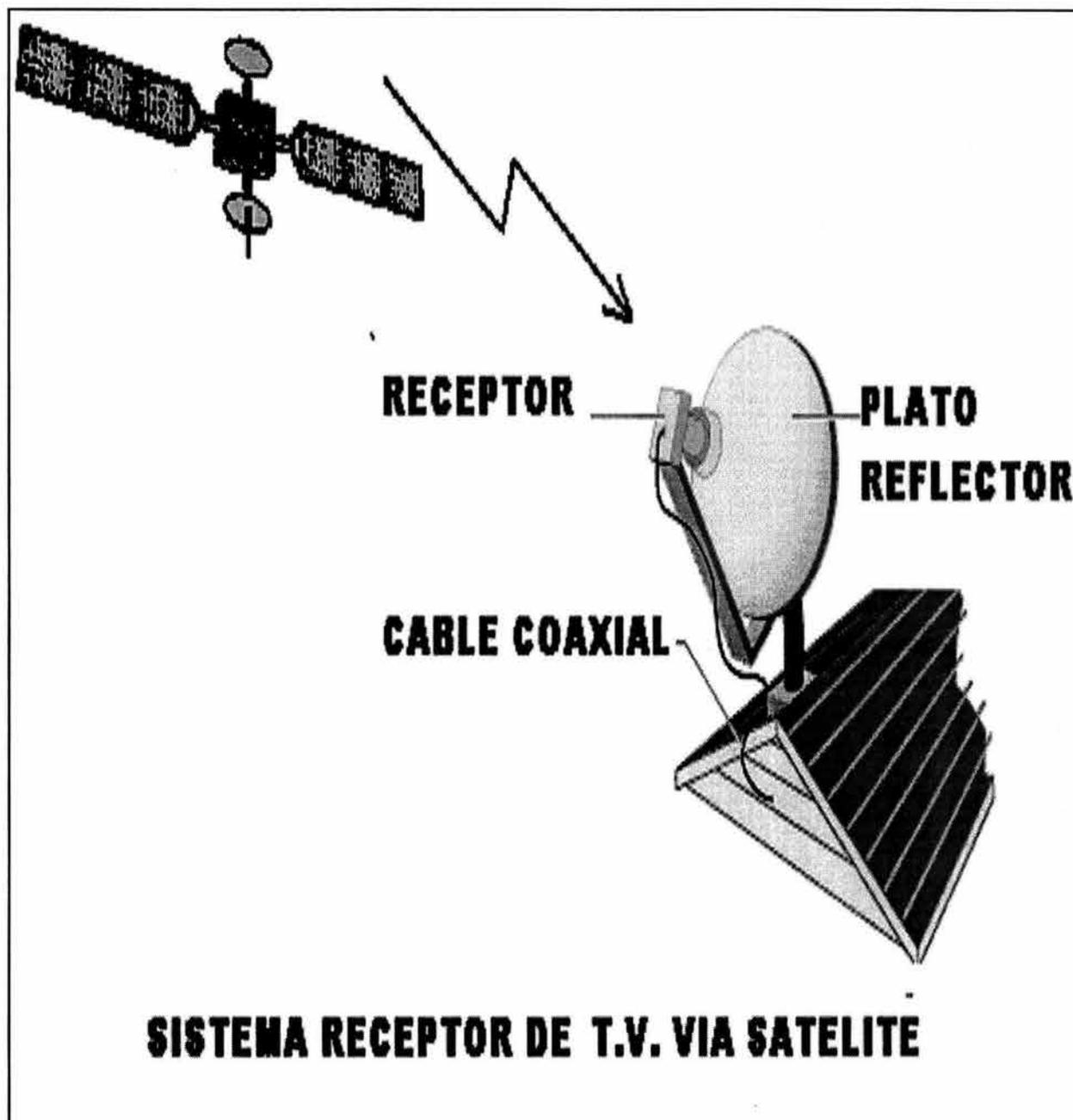


FIGURA 1.3. RECEPCIÓN VÍA SATELITE

- 1.4.2 ● los sistemas de localización global (fig. 1.4), (incluyendo comunicaciones marítimas, móviles terrestres y aéreas con voz, fax, datos e internet móvil), y de ayuda en desastres,

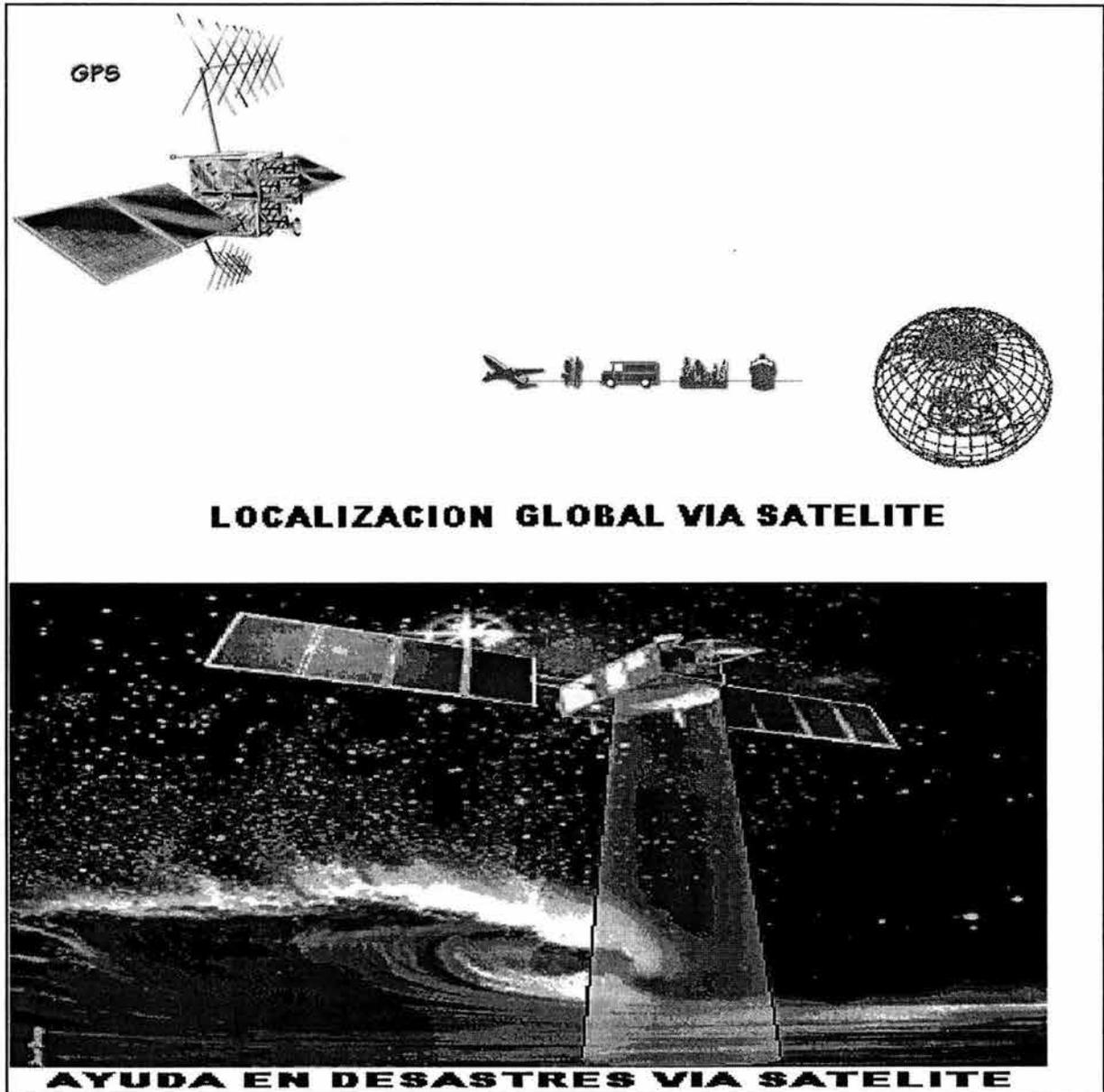


FIGURA 1.4 LOCALIZACIÓN Y AYUDA EN DESASTRES

- 1.4.3
- como complemento a las redes terrestres con conexión mediante telepuertos y unidades de apoyo para el desarrollo de la telefonía rural o de difícil acceso y telefonía celular, así como para programas de educación a distancia, telemedicina y transmisión de eventos especiales (ver fig. 1.5):

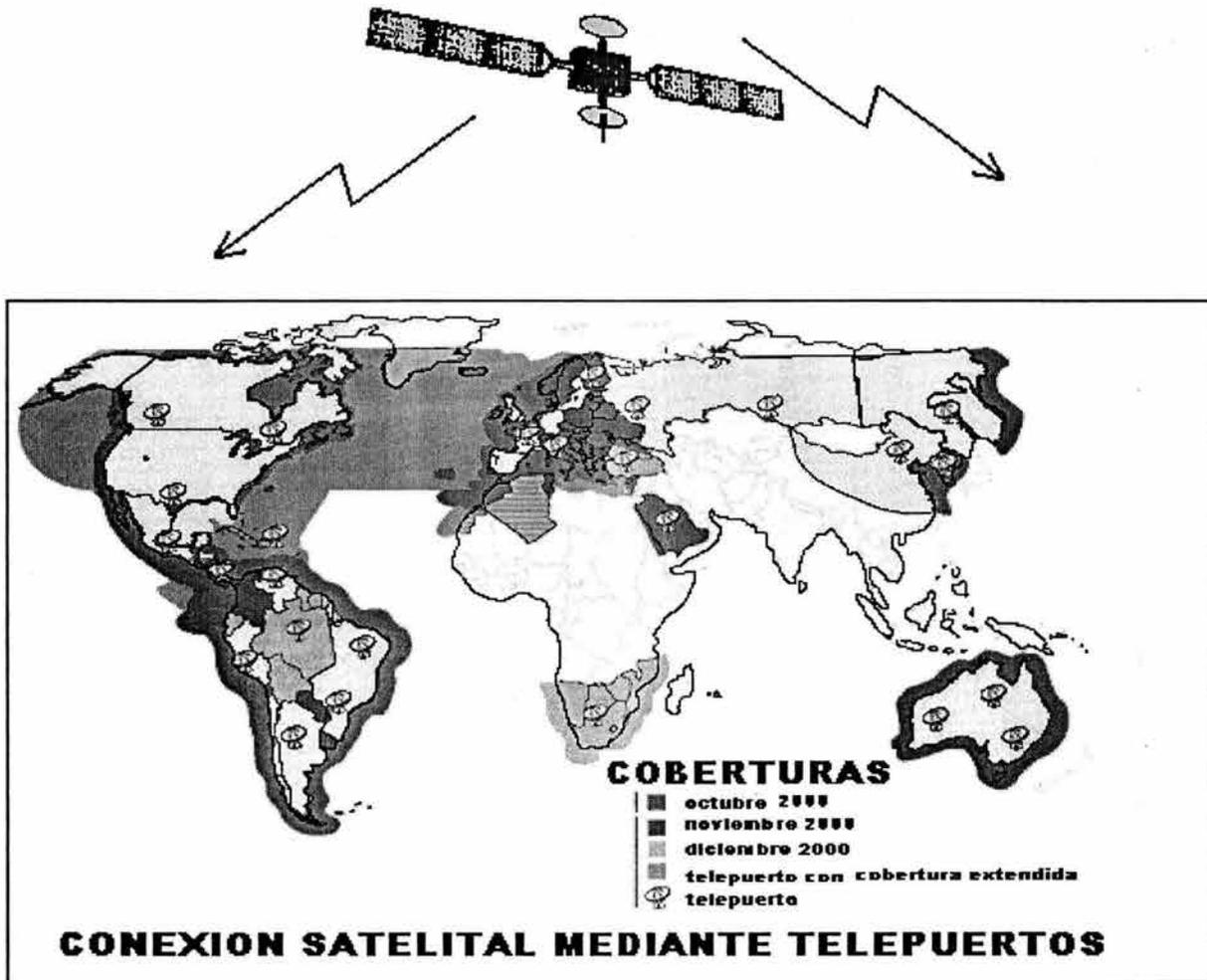
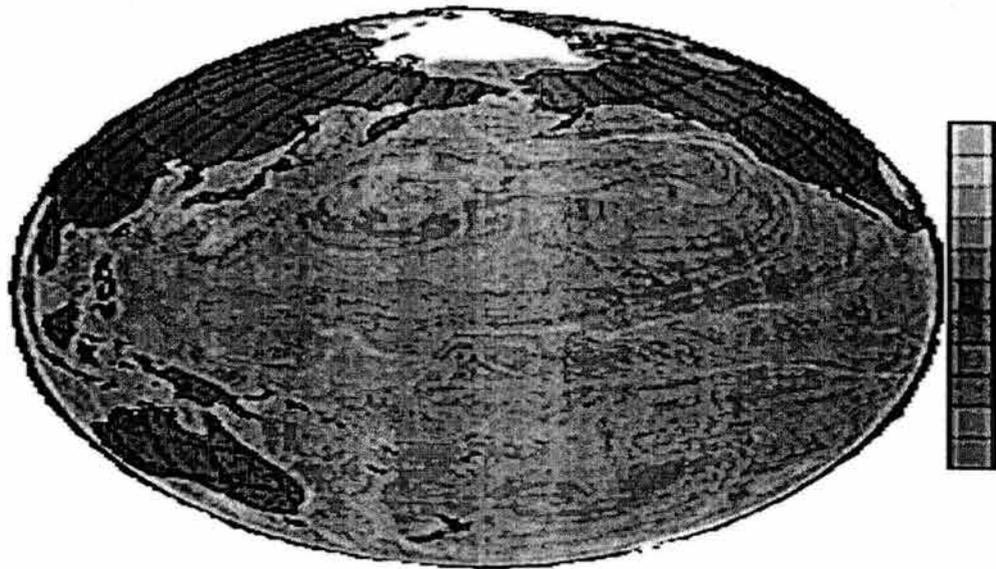
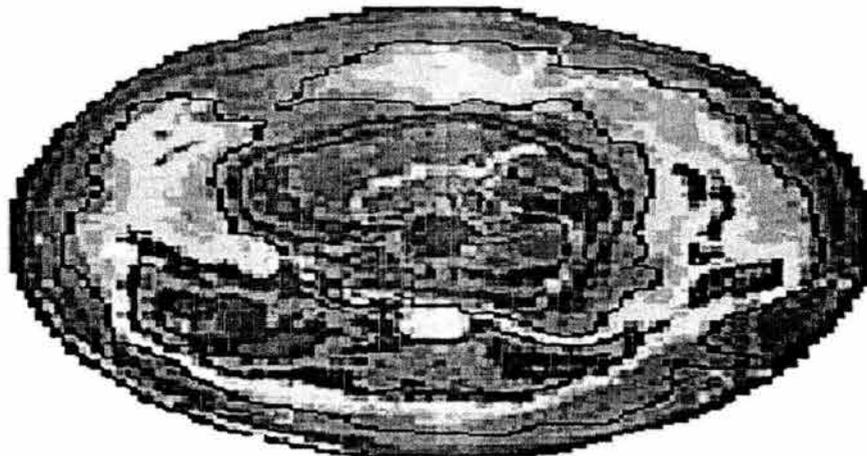


FIGURA 1.5 COMPLEMENTO A REDES Y EVENTOS ESPECIALES

- 1.4.4
- apoyo para investigación: estudios del espacio exterior, control y aprovechamiento de diversos recursos naturales (bosques, océanos y desiertos) y para prevención de condiciones ambientales adversas) (fig. 1.6):



**SEGUIMIENTO DEL FENOMENO
DEL NIÑO MEDIANTE
SATELITES ARTIFICIALES**



**VISTA SATELITAL
DE LA CAPA DE
OZONO**

FIGURA 1.6 INVESTIGACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS

1.4.5 • Comunicaciones militares, control y defensa de soberanía nacional.

1.4.6 • Comunicación inmediata de noticias y eventos diversos.

Cualquier eventualidad, como son los desastres y accidentes, en cualquier parte del mundo, pueden transmitirse inmediatamente a través de estaciones terrenas móviles.

TENDENCIAS EN LAS TELECOMUNICACIONES

Actualmente el tráfico telefónico y de datos se apoya cada vez más en las redes terrestres de fibra óptica con servicios digitales integrados (en las que se fusiona el procesamiento digital con la inteligencia de las redes, con muy buena confiabilidad y gran ancho de banda), que las hace adecuadas incluso para manejo de tráfico intercontinental y para los futuros sistemas de transmisión multimedia, según se muestra en la figura 1.7

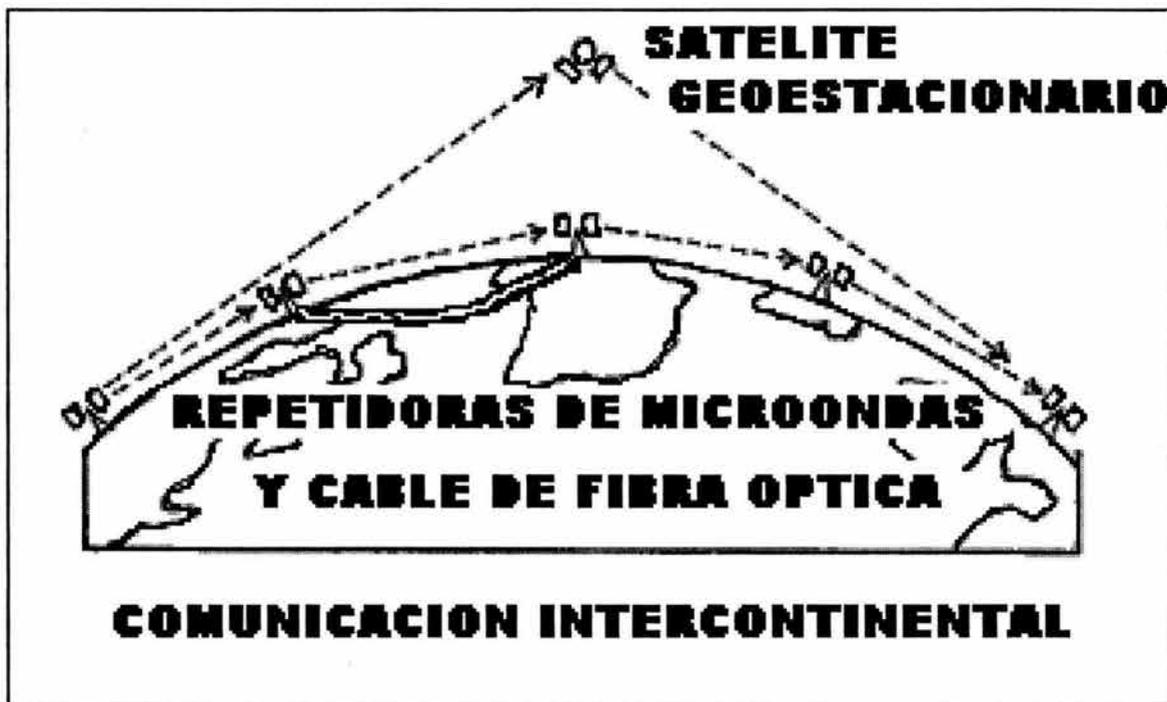


FIGURA 1.7 COMUNICACIONES VÍA FIBRA ÓPTICA Y MICROONDAS

En Europa la tendencia actual es al empleo de redes híbridas, combinando redes terrestres con los servicios satelitales de tal forma que estos últimos forman parte de las redes de servicios digitales integrados.

En los Estados Unidos de Norteamérica no se considera en demasía el papel que los satélites puedan tener con las redes digitales, sin embargo es obvio que aunque las redes terrestres alcancen su madurez o pleno desarrollo, los satélites son y seguirán siendo indispensables para las telecomunicaciones en general y, mientras tanto, como ya se comentó, es innegable su necesidad para las telecomunicaciones de los países en desarrollo.

Recientemente se ha observado cierto fracaso en su aplicación para la telefonía móvil, pues los sistemas celulares se popularizan cada vez más, son más baratos y tienden a lograr cobertura intercontinental, sin embargo existe un buen mercado para Internet a alta velocidad y mensajería a través de las constelaciones de satélites de órbita baja.

La mensajería sola es un servicio que también tiende al desuso, sin embargo, en mi opinión, puede recobrar mercado si se le incluye internet, con opciones de compra de productos diversos y una tarifa de renta menor a la de la mensajería en los celulares pues, de otra manera es obvio que la telefonía celular ofrece más por el mismo precio pues los nuevos sistemas tienden al uso de la banda ancha con servicios multimedia.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN GENÉRICA DE UN SISTEMA SATELITAL

2.1 Segmentos. El enlace, mostrado en la fig. 2.1, consta de:

- Segmento terrestre. Conformado esencialmente por las estaciones receptoras de los diversos usuarios del servicio satelital.
- Segmento espacial. Conformado por el satélite en órbita y las instalaciones y equipos en tierra necesarios para su control y operación durante su vida útil, éstos últimos denominados de Control, telemetría y rango (Tracking, Telemetry and Command facilities o TT&C). El conjunto incluye un centro de control primario y uno de respaldo o secundario.

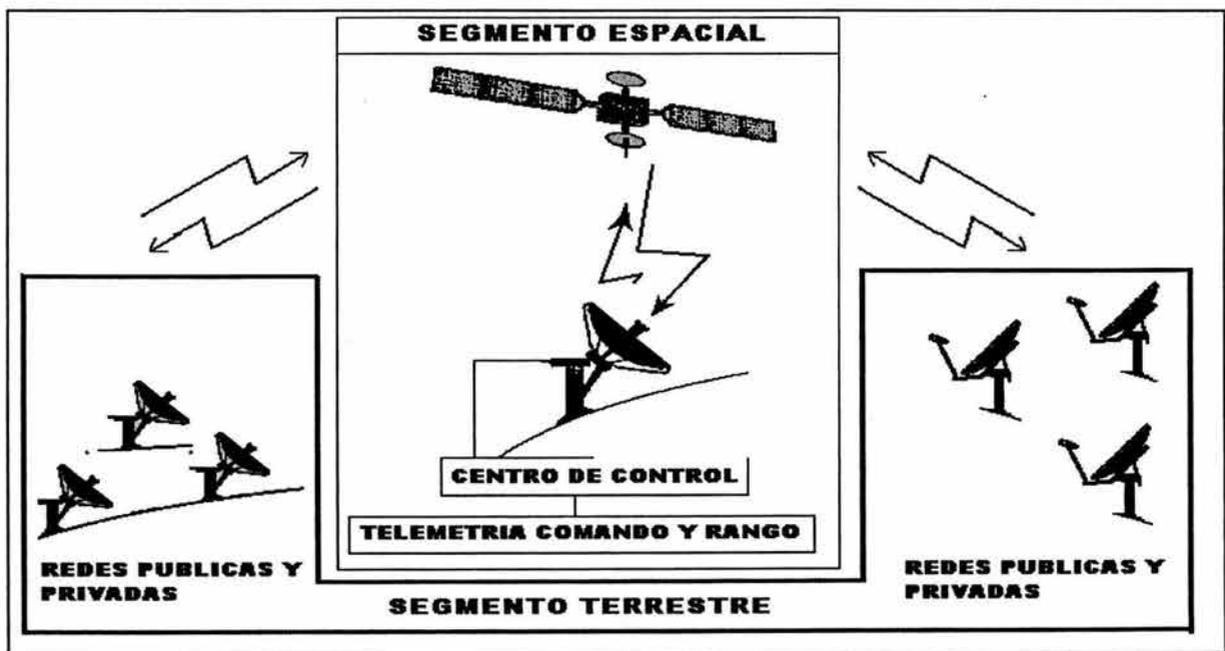


FIGURA 2.1 SEGMENTOS ESPACIAL Y TERRESTRE DE UN ENLACE SATELITAL

2.1.1 COMPONENTES OPERATIVOS DE LA ESTACIÓN TERRENA (USUARIOS)

<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin-bottom: 10px;"> LAS PARTES MÁS IMPORTANTES DEL ENLACE SATÉLITAL </div>	(subida):	Interfaz con el usuario:	Interconecta la información del usuario con el sistema satelital.
		Modulador	desplaza hacia una posición más alta en frecuencia la información
		Convertidor de subida	Se desplaza la señal modulada hacia una frecuencia intermedia y de ahí hacia una frecuencia de microondas.
		Amplificador de potencia (HPA)	Amplifica las señales de microondas multiplexadas y las entrega a la antena con un nivel adecuado.
		Antena	Radía la energía hacia lugares o áreas determinadas.
		Antena	Su tamaño, ganancia y temperatura de ruido deben ser los adecuados para la señal que se recibe.
	(bajada):	LNA (Amplificador de bajo ruido)	El parámetro más importante de este amplificador es su temperatura de ruido que se busca lo más baja posible para aumentar la calidad de recepción.
		Convertidor de bajada	La señal recibida del satélite se convierte a una frecuencia intermedia.
		Demodulador	Cancela la frecuencia de la portadora y deja la información
		Interfase con el usuario	

Los usuarios conforman tanto redes públicas como privadas.

Los componentes, comunmente empleados en las estaciones terrenas , se muestran de manera general en la figura 2.2:

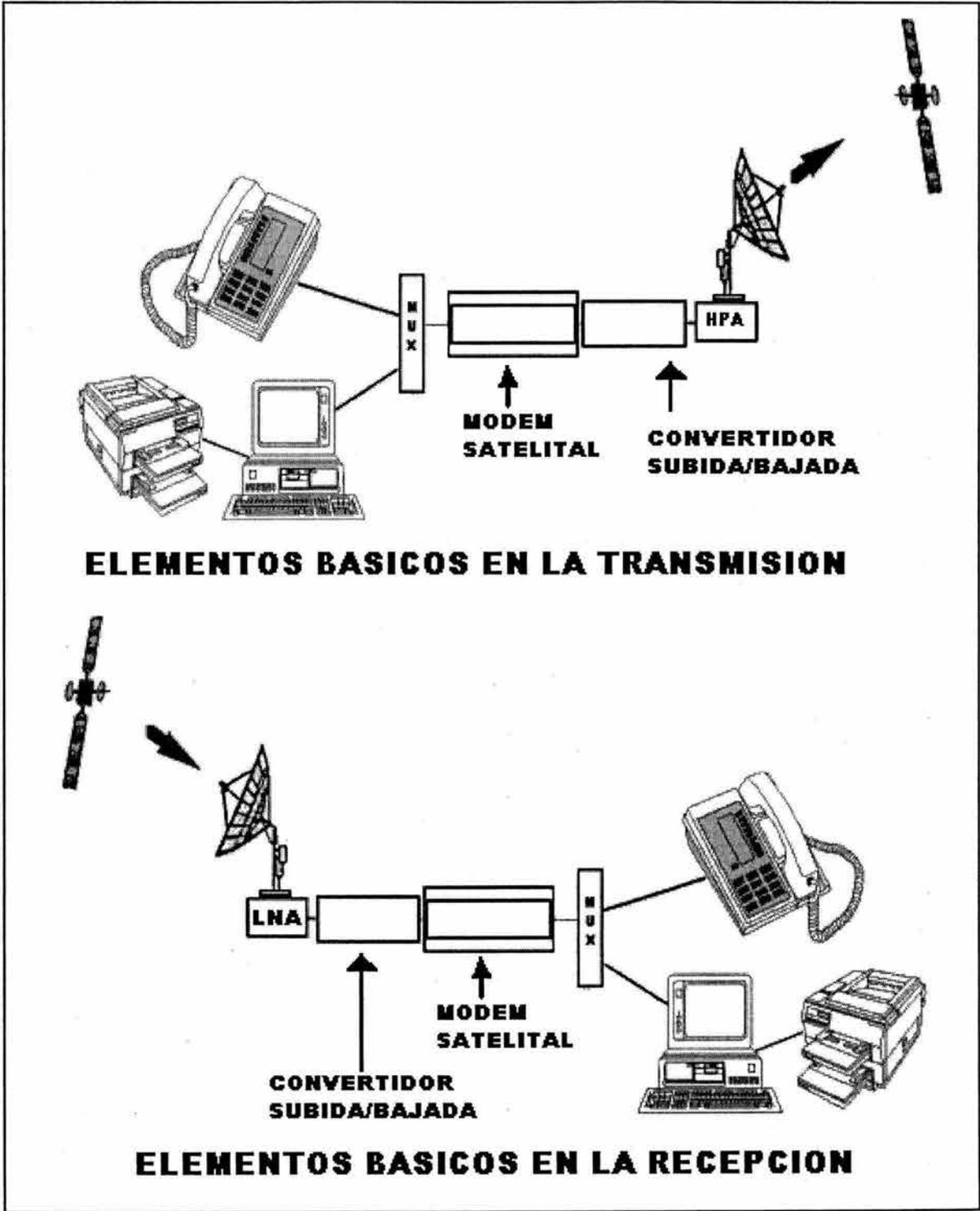


FIGURA 2.2 EL ENLACE SATELITAL ENTRE USUARIOS

2.1.2 SEGMENTO ESPACIAL

Conformado por el satélite y el Centro de Control. Su misión es controlar el satélite para mantenerlo en órbita, pues la triaxialidad del campo gravitatorio de la tierra siempre provoca cambios en la velocidad del satélite que se traducen en deriva este - oeste (longitudinal) y, la atracción de los cuerpos celestes (sol, tierra, etc.), producen una inclinación de la órbita conocida como deriva norte - sur. Además de otras fuerzas desestabilizadoras del equilibrio como son el viento solar cuyo efecto contrario cada seis meses prácticamente se autonivela, y la disminución de combustible que altera el centro de masa del satélite. Por consiguiente, el centro de control monitorea los datos posicionales y recalcula la diferencia con los parámetros orbitales y determina periódicamente las maniobras de corrección de orientación para el reposicionamiento orbital que aseguran la operabilidad del mismo

2.1.2.1 SEGMENTO ESPACIAL EN TIERRA

El segmento espacial en tierra básicamente consta de los siguientes subsistemas:

- 1) Subsistema de banda base. Con los equipos necesarios para el procesamiento de las señales de telemetría, comando y medición de la distancia al satélite. Permite la planeación de maniobras requeridas para el control geoestacionario.
- 2) Subsistema de monitoreo de comunicaciones. Interconectado a las antenas del centro de control, realiza el monitoreo de los parámetros de los canales de los satélites, midiendo potencia, frecuencia, ancho de banda, discriminación de polarización cruzada, patrones de radiación, emisiones espurias, relación C/N, forma y densidad espectral. Modulación en amplitud, ruido y mediciones para calibración además de otros parámetros para el tráfico de telefonía, SCPC, PSK, FDMA, portadoras TDM,

PSK, TDMA y de TV (FM/FDMA).

- 3) Subsistema de antenas y radiofrecuencia. Cuenta con antenas con capacidad de recepción y transmisión en polarización ortogonal que se emplean para telemetría, rastreo, comando y medición de la distancia al satélite, además de las antenas que tienen posicionamiento remoto y despliegue de datos de acimut y elevación para las bandas C, Ku, etc.
- 4) Laboratorio para pruebas de la carga útil. Provee de una herramienta de simulación, investigación desarrollo y entrenamiento en comunicaciones satelitales, simulando la carga útil de los satélites, con capacidad de almacenar tráfico representativo y equipo de medición y desempeño de los transpondedores. Todo ello en circuito cerrado de simulación.
- 5) Equipo para pruebas en órbita. Mide y evaluar el desempeño del satélite en la órbita geostacionaria en sus diversas bandas sin tráfico, el estado de los transpondedores y realiza pruebas de telemetría y comando. Además permite calibrar la antena de la estación de control en tierra y equipo de radiofrecuencia, recolecta automáticamente datos y procesa las señales de calibración y prueba recibidas.

El segmento espacial en tierra siempre incluye a otro centro de control alternativo que cuenta cuando menos, con los tres primeros subsistemas anteriormente mencionados y los enlaces necesarios entre dichos centros de control para garantizar el respaldo, en caso de falla, con el acceso a toda la información.

2.1.2.2 SEGMENTO ESPACIAL EN ÓRBITA

A continuación se desglosan los detalles más importantes de los subsistemas del satélite.

2.1.2.2.1 SUBSISTEMAS DEL SATÉLITE



2.1.2.2.1.1 SUBSISTEMA DE COMUNICACIONES/ANTENAS

Las antenas satelitales en órbita están sujetas a las condiciones extremas del espacio exterior, con temperaturas que en la sombra tienden al cero absoluto y en el sol suben a más de 100 °C, además de la presencia del viento solar, así como al eventual impacto de micrometeoritos y el continuo bombardeo de diversas partículas cargadas que afectan la superficie de todo tipo de material.

Como resultado de esas condiciones extremas, pueden producirse deformaciones y grietas en las antenas y superficies por lo que es necesario protegerlas mediante el empleo de materiales ligeros pero resistentes, con buena rigidez y bajos coeficientes de expansión térmica y conductividad de calor. Actualmente se han desarrollado compuestos plásticos y de resinas, combinados con Kevlar y carbono (CFRP, KFRP y Nomex), que cumplen lo anterior y que se aplican sobre estructuras con aleaciones de titanio y de aluminio para la construcción de este tipo de antenas.

Las antenas varían desde: Omnidireccionales hasta altamente directivas y son empleadas tanto en satélites geoestacionarios como en los de órbitas bajas, medias y elípticas. Actualmente los satélites no sólo se emplean como repetidores pues algunos también realizan funciones meteorológicas y de proceso a bordo. El rango de frecuencias en que trabajan va de 0.1 a 200 GHz.

De acuerdo a la función del satélite las antenas se clasifican en las siguientes categorías:

I) DE COMUNICACIÓN.

II) DE TELEMETRÍA, COMANDO Y RANGO.

III) ESPECIALES: METEOROLOGICAS, DE INTERENLACE Y DE AUTORASTREO.

I.- ANTENAS DE COMUNICACIÓN

I.- Para los servicios fijos satelitales y enlaces móviles marinos se ha preferido por su directividad a los platos parabólicos y los arreglos de fase, por consiguiente las antenas de comunicación típicas son:

- a) de reflector/lente y
- b) de arreglo de fases.

La antena de reflector es la más usual debido a que es ligera, de estructura simple y diseño probado. Sin embargo si se emplea con haces múltiples debe utilizarse la tipo offset para evitar bloqueo de alimentación. Los alimentadores clásicos del plato reflector son las antenas tipo corneta (ver figs. 2.3 y 2.4).

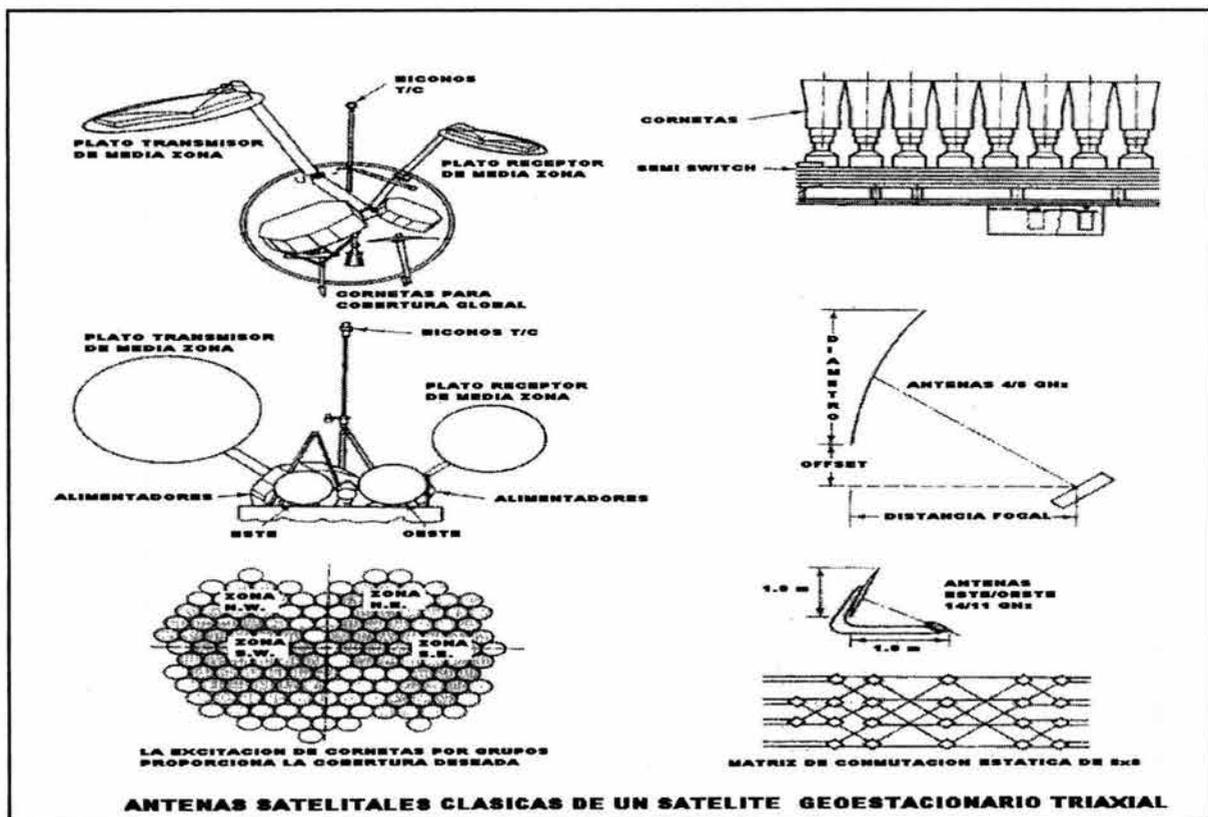


FIGURA 2.3 ANTENAS DEL SATELITE GEOESTACIONARIO

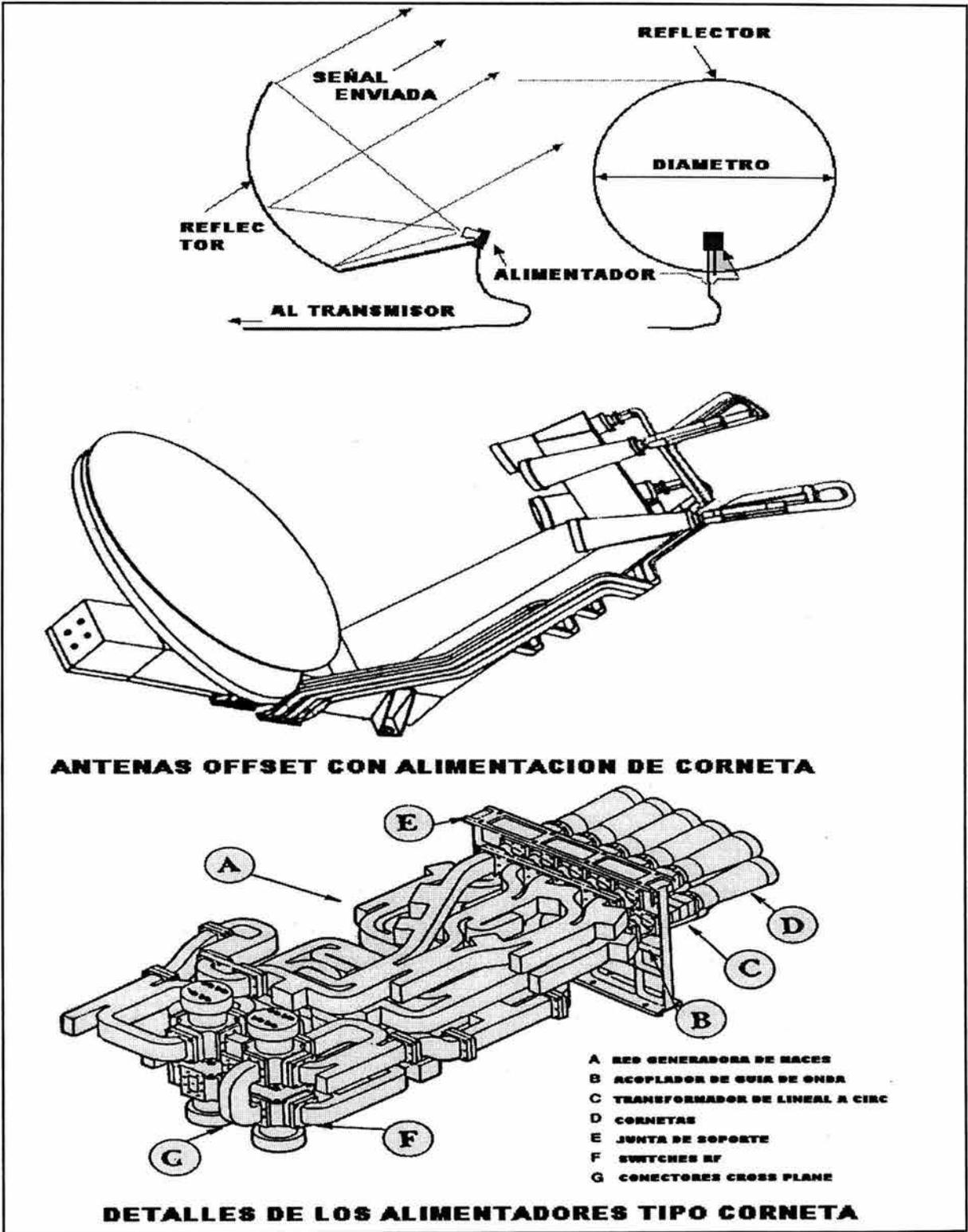


FIGURA 2.4 ALIMENTADORES TIPO CORNETA.

A) Sistema de antena reflector/lente

La antena es iluminada por un arreglo de elementos alimentadores y genera:

- a) un patrón multihaz a partir de una abertura óptica.
- b) un patrón de radiación más fino que implica mayor aislamiento espacial
- c) nulos para la interferencia.

El arreglo alimentador consta de los elementos alimentadores y un canal de tipo stripline o de tipo guía de onda, el primero se usa para banda C y el segundo para banda K y frecuencias superiores. Este tipo de antenas se han usado en los satélites INTELSAT.

En las antenas que incluyen el lente (fig. 2.5), este es el complemento del reflector y puede rotar para mejorar las características de transmisión/recepción.

B) Sistema de arreglo de fases

La antena de arreglo de fase es un conjunto de pequeñas antenas interconectadas de tal forma que sus patrones de radiación mutuos se refuerzan en ciertas direcciones y se cancelan en otras y de esta manera las señales recibidas o transmitidas estén con la fase adecuada que corresponde a un patrón de radiación deseado. Los arreglos más empleados son:

- Antenas dipolos.
- Arreglo de cornetas.

Los arreglos de fase emplean el concepto de "arreglo de fase activo" que compensa las grandes pérdidas del BNF; se tienen dos tipos: con arreglo completo de estado sólido y con arreglo monolítico híbrido. Su costo es menor comparado con la tecnología

de componentes de estado sólido, conmutadores de ferrita y guías de ondas existentes.

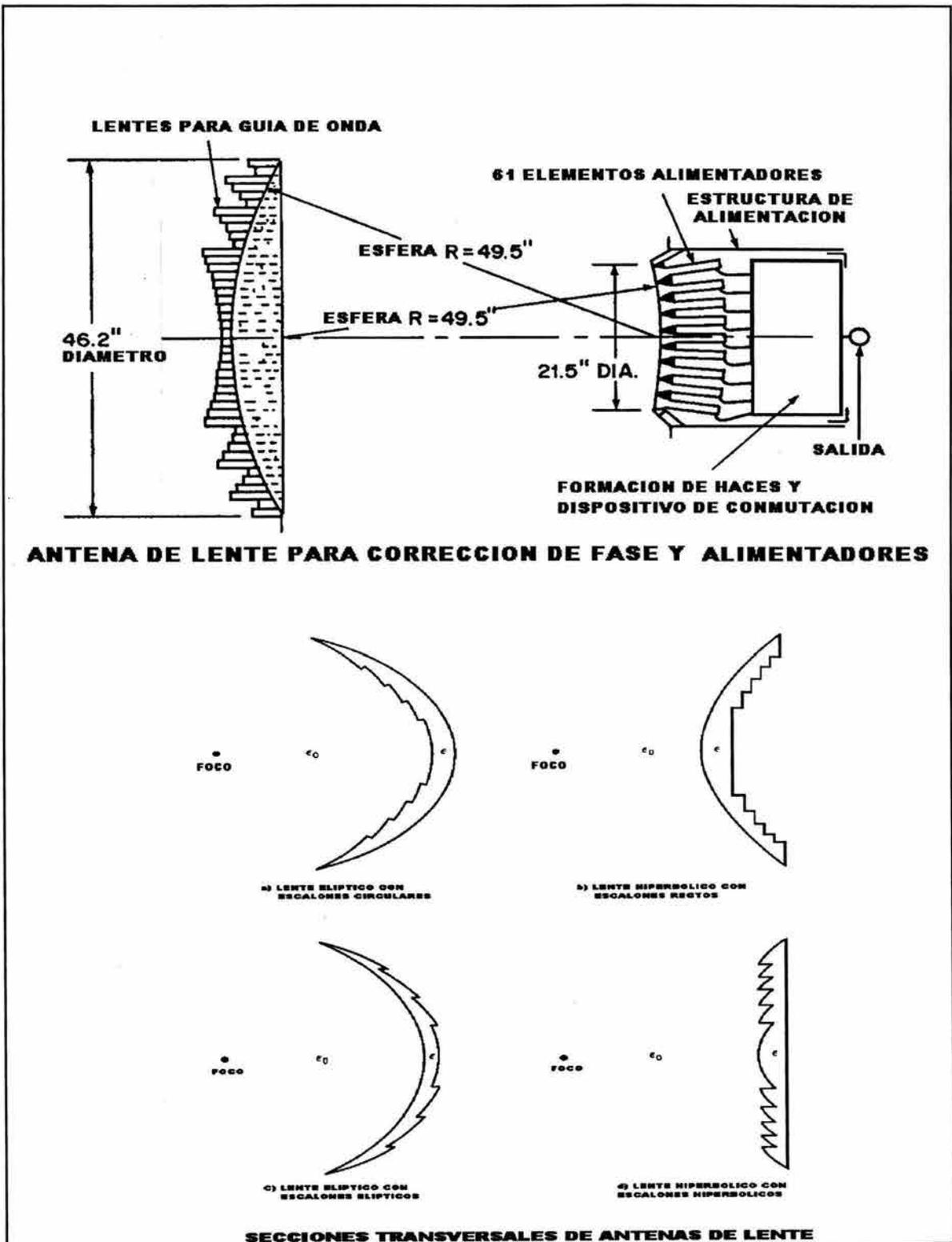


FIGURA 2.5 ANTENAS DE LENTE.

Los laboratorios Comsat han desarrollado un prototipo de 64 elementos para la banda Ku del INTELSAT para cubrir el océano Atlántico. Otra posibilidad es su uso en la banda S.

Las antenas de arreglo de fases presentan mucho mayores ventajas sobre los otros tipos como son: distribución de la potencia en un nivel elemental de radiación, mayor eficiencia de abertura, prácticamente no hay desborde o spillover, no hay bloqueo de abertura y mejor confiabilidad, las desventajas son mayor peso, complejidad y relativamente altas pérdidas en el sistema de distribución de potencia.

Recientemente también se han utilizado los arreglos de cornetas con matriz de conmutación para cubrir zonas reducidas, conmutando la alta directividad de la cobertura bajo demanda y permitiendo el reuso de frecuencias pues ahora se cuenta con separación espacial, además de las polarizaciones ortogonales que permiten el reuso de frecuencias en una misma área, duplicando la capacidad del satélite, según se muestra en la fig. 2.6 :

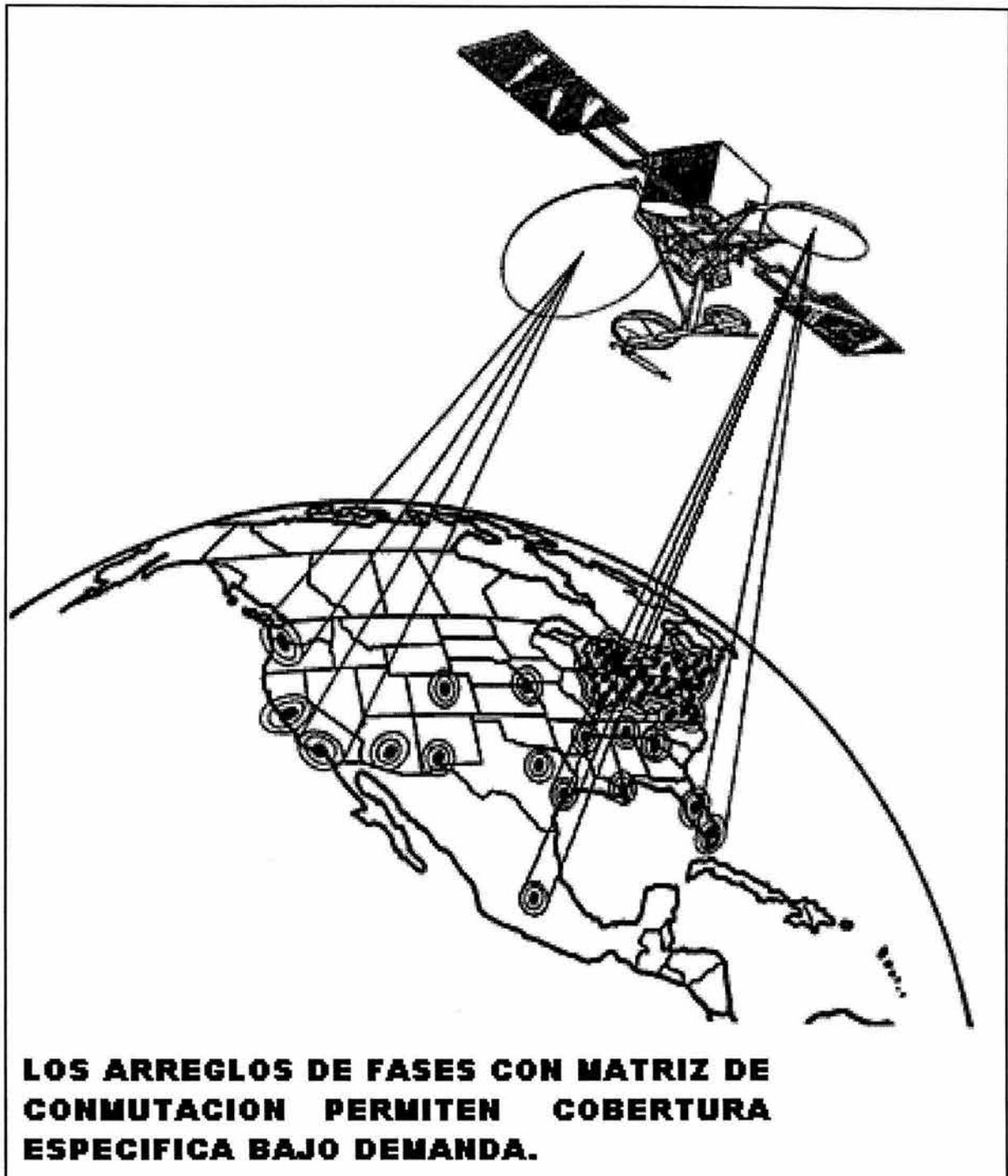


FIGURA 2.6 ANTENAS PARA COBERTURA ESPECIFICA.

B) Opciones para la cobertura especifica de contornos

Los requerimientos actuales de cobertura obligan a obtener un patrón de radiación o huella que se ajuste al contorno de una región

geográfica dada o con posibilidad de reconfiguración; Las técnicas actuales para lograr este objetivo son:

- a) con varias cornetas o con un arreglo de fases (fig. 2.7).
- b) modificando las superficies reflectoras para producir la huella específica (figura 2.8).

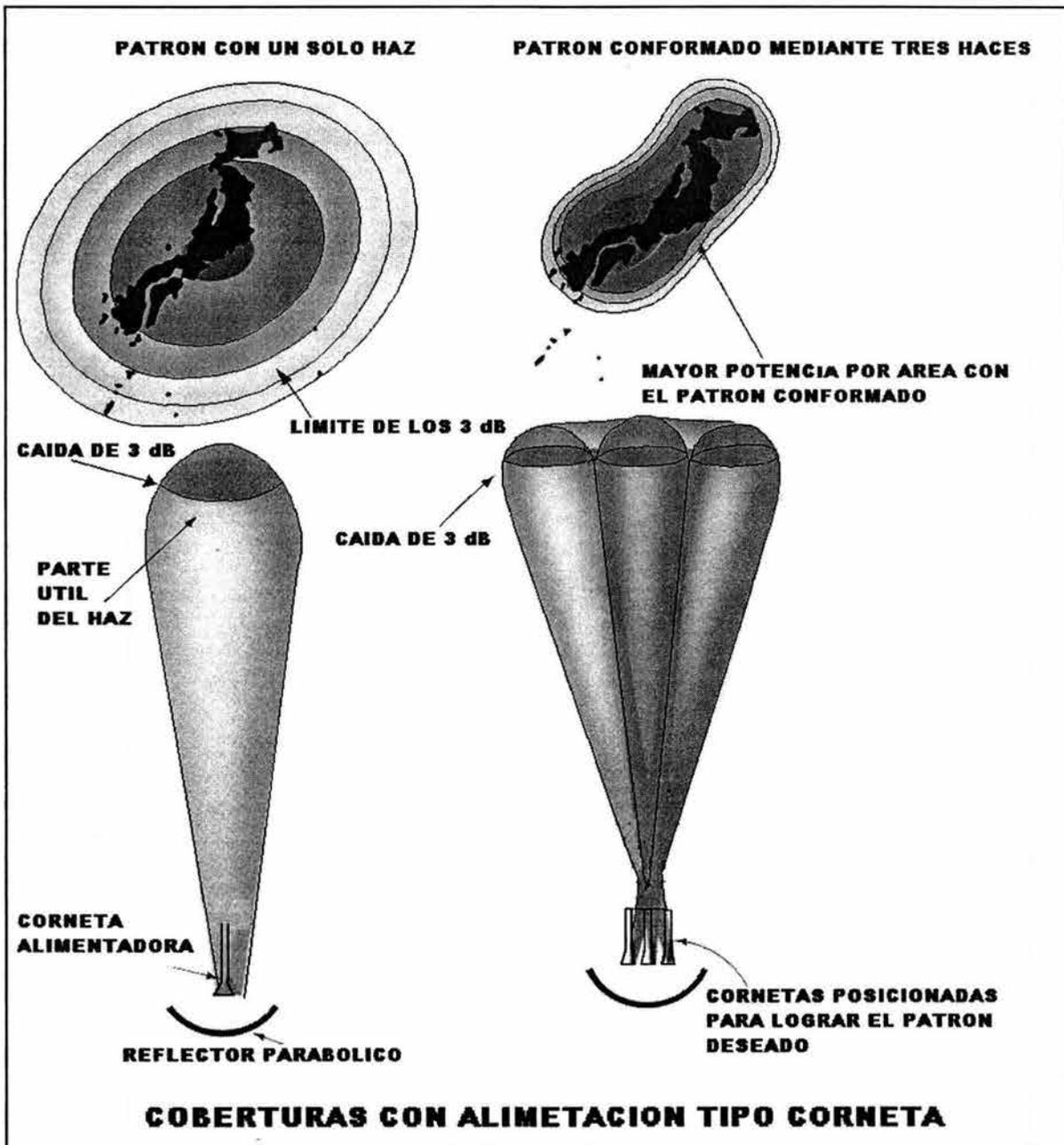


FIGURA 2.7 ANTENAS DE CORNETA PARA CUBERTURA ESPECIFICA

Actualmente se prefiere la opción b), en la que se altera la superficie de un plato reflector de tal manera que no sea totalmente parabólica ("superficie chipotuda, deformada o perfilada") y se obtenga la distribución de corriente y fase correspondientes a la cobertura deseada (es decir se logra un mapeo geométrico entre el plano de apertura y el campo lejano para cubrir una zona específica, al aplicar la transformada de Fourier y técnicas numéricas iterativas que conducen a la modificación de la superficie). Esta construcción resulta más económica que el arreglo de fases con matriz de conmutación y ha sido utilizada por los japoneses desde 1995 en su satélite JCSAT y muchos satélites modernos.

En el caso más simple el plato conformado es iluminado por un alimentador. La superficie reflectora puede ser sólida, de rejilla o de malla. El reflector sólido se diseña para producir un patrón de radiación específico y no es posible reconfigurarlo posteriormente. Los diseños más complejos emplean dos superficies reflectoras.

En resumen, las variantes de las técnicas mencionadas anteriormente son:

- Antena parabólica con superficie conformada (superficie deformada o perfilada), alimentada por una corneta. Este tipo se emplea en el satélite Satmex5 (ver figura 2.8).
- Sistema con reflector principal parabólico y subreflector conformado. Este método obtiene los mismos resultados que el caso previo y produce la huella deseada modificando una superficie más pequeña (lo cual puede hacerse aún estando ya en órbita el satélite).

Con ellas se logra dirigir la energía radiada hacia coberturas específicas. En una cobertura dada, el nivel de concentración de energía disminuye de la parte central hacia la periferia mediante contornos prefijados bajo diseño (por ejemplo 38,37,36 dBW, etc. ver fig. 2.8).

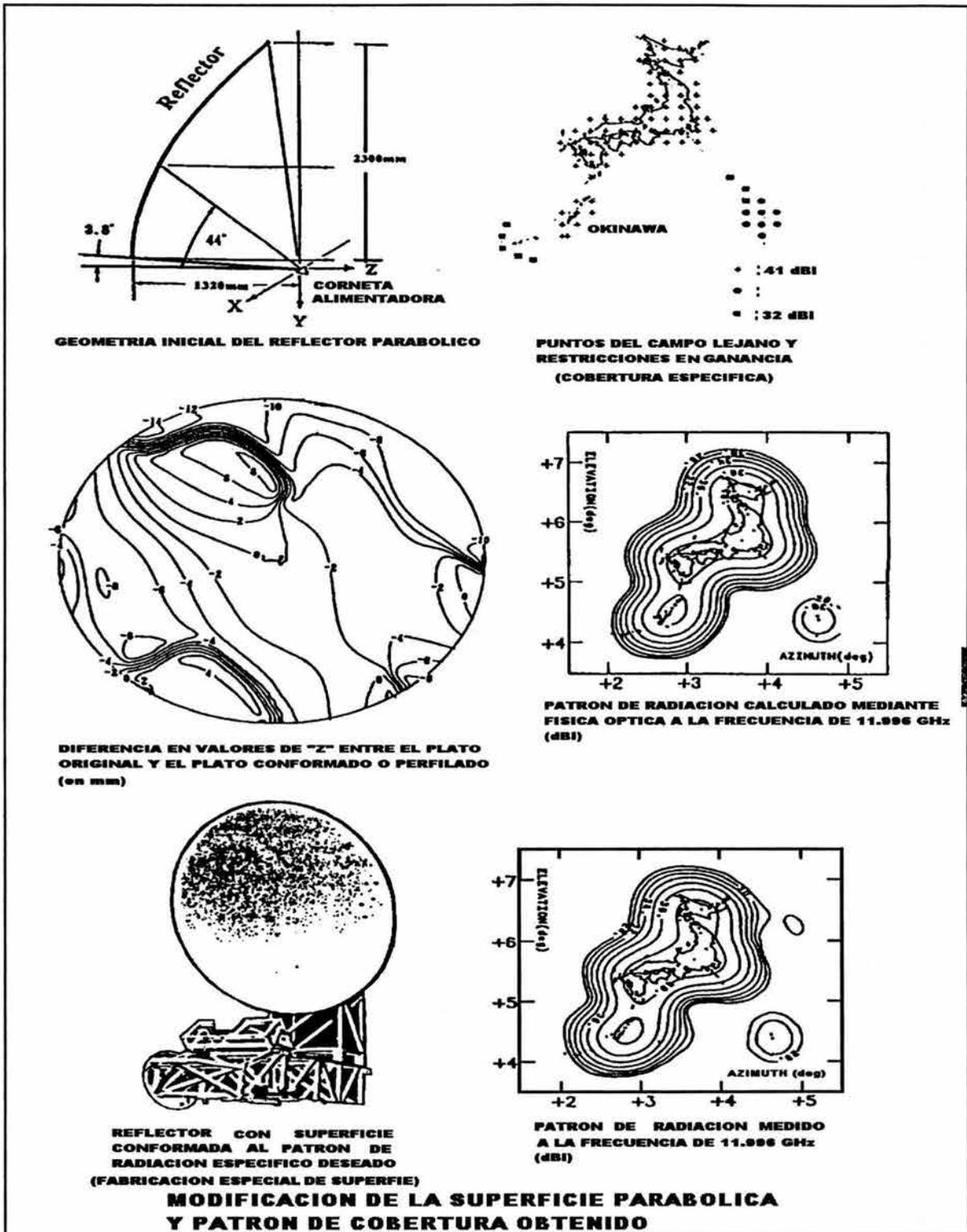


FIGURA 2.8 ANTENAS CONFORMADAS PARA CUBERTURA ESPECIFICA

- Antena construida con materiales inteligentes (piezocerámicas inteligentes) que modifican su grosor o forma por la aplicación de voltajes. Se trata de nuevas cerámicas conductoras que podrán ser la base de construcción de los reflectores que se conformarán bajo programación para obtener la huella o cobertura específica del satélite (se cuenta con prototipos experimentales en los que la superficie unida a la cerámica se "curva" en un sentido al aplicar el voltaje y en el otro al cesar, con ello se logra el "ajuste" similar al de la vista humana que mira hacia uno u otro lado, ver fig. 2.9).

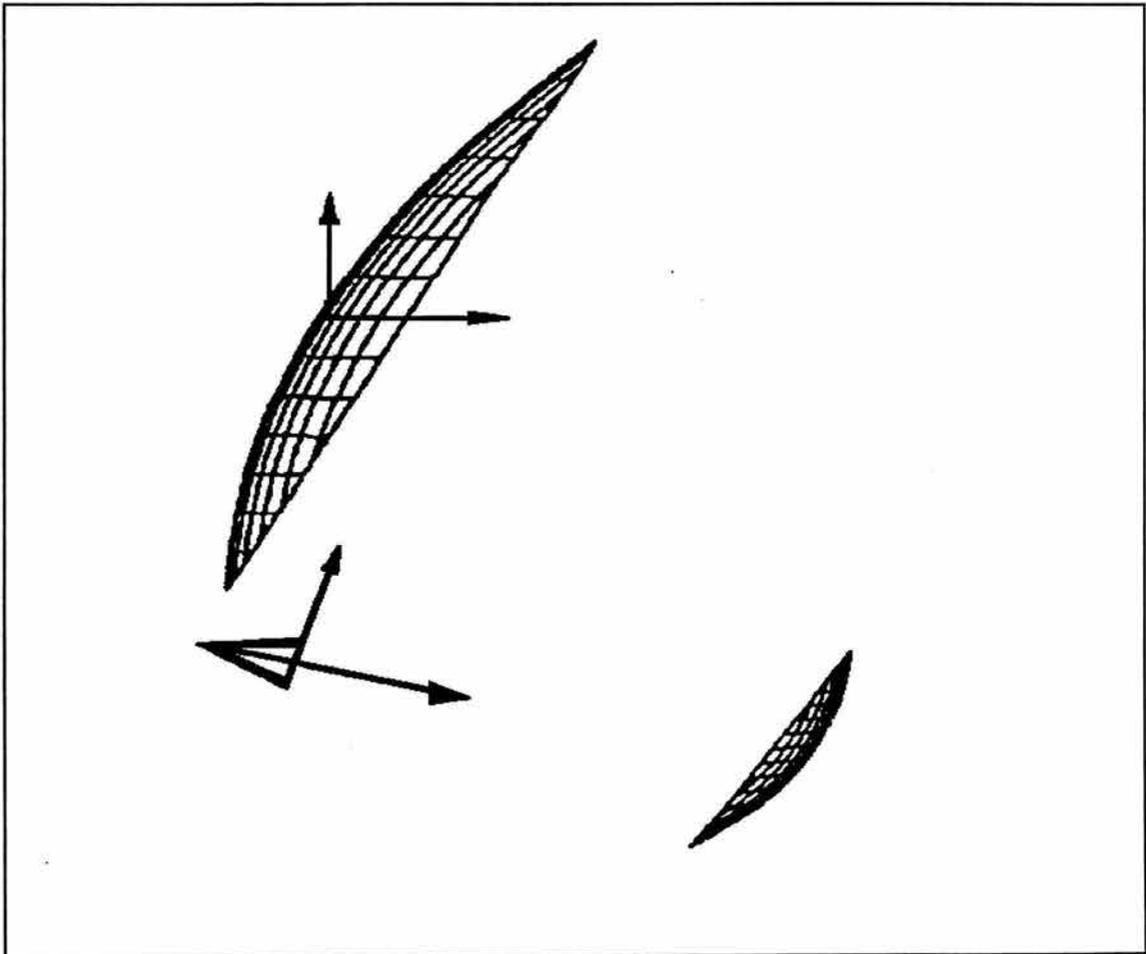


FIGURA 2.9 ANTENAS PIEZOCERAMICAS INTELIGENTES.

II.- ANTENAS DE TELEMETRÍA, COMANDO Y RANGO

Permiten comandos de operación y telemetría en todas las fases de colocación del satélite una vez que se ha separado del vehículo lanzador. Son de tipo no direccional y de polarización circular (ver figura 2.10).

Para un satélite cilíndrico se utiliza un arreglo circular alrededor del satélite; las de tipo bicónico se emplean para minimizar la dispersión y reducir el bloqueo de la línea de vista, con patrón de radiación toroidal y ancho del haz de 18 grados; el caso más simple de radiación omnidireccional emplea 4 varillas metálicas de $1/4$ de λ ; la antena de forma de cardioide también se emplea como aproximación de un haz omnidireccional. Estas antenas se usan para la puesta en órbita y casos de contingencia.

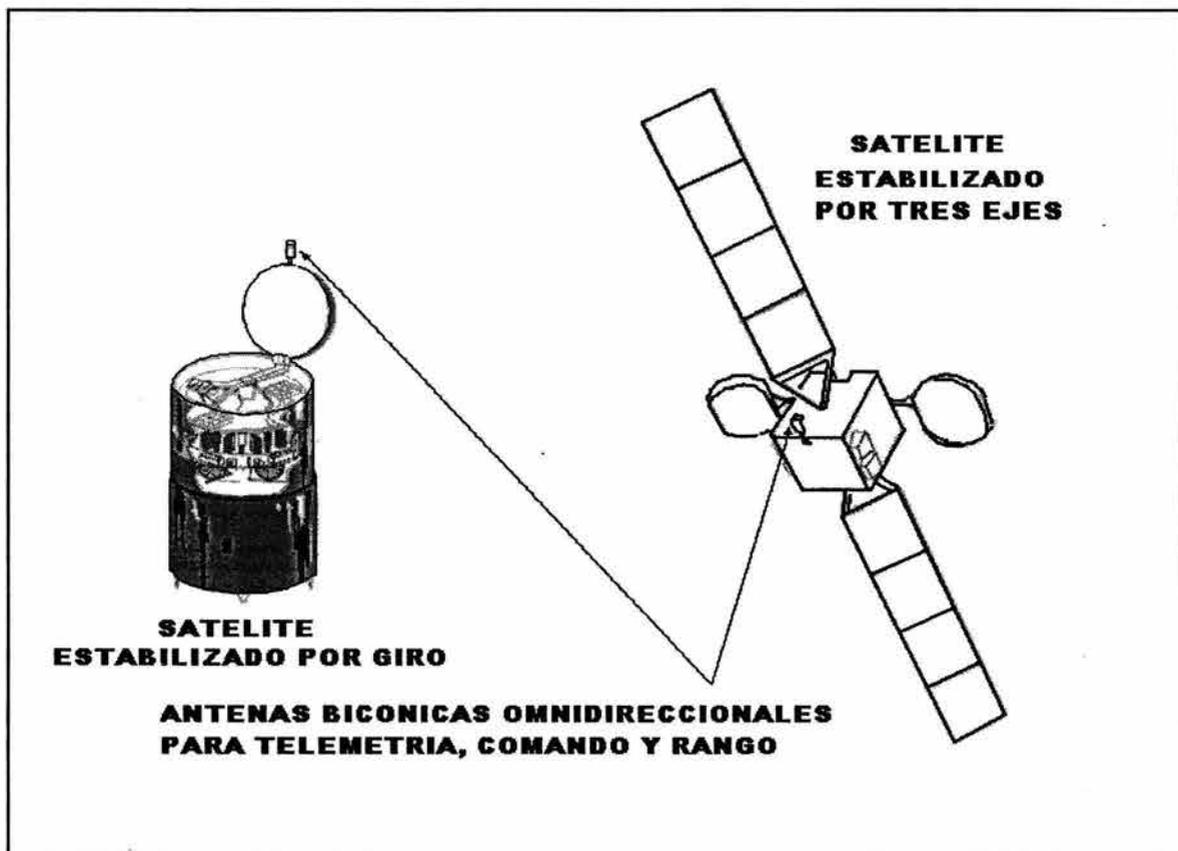


FIGURA 2.10 ANTENAS OMNIDIRECCIONALES.

III:- ANTENAS ESPECIALES

a).- De cobertura terrestre.

Comúnmente se emplean cornetas con un buen polarizador y haz rotacionalmente simétrico de al menos $\pm 9^\circ$ sobre todo el ancho de banda, lo cual se logra mediante corrugación de la superficie y preferentemente mediante cornetas en modo dual. Las antenas de corneta clásicas se muestran en la figura 2.11:

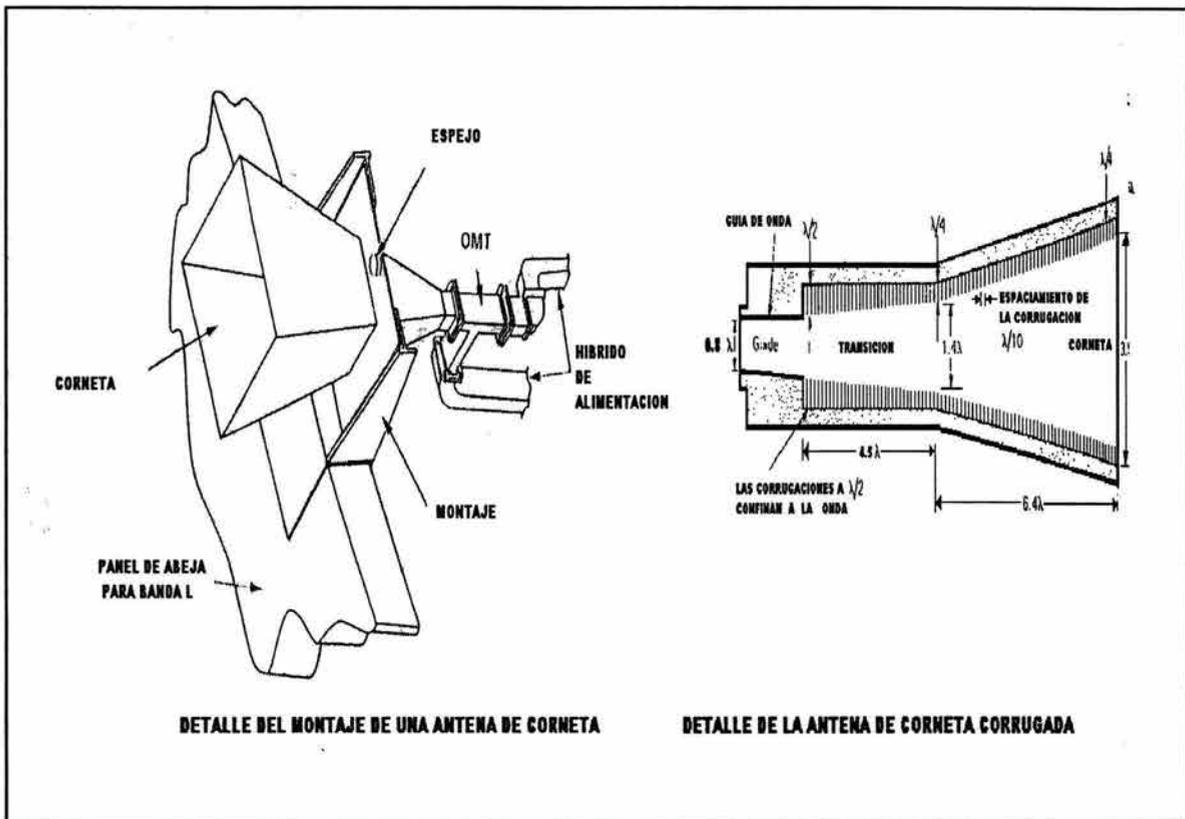


FIGURA 2.11 ANTENAS CORNETA PARA CUBERTURA TERRESTRE

b) Radiómetro

El satélite pasivo de ondas milimétricas o radiómetro es de mucho mayor utilidad que otros instrumentos para análisis meteorológicos y de pronóstico meteorológico, sin embargo el tamaño de las antenas requeridas y su peso son todavía un problema y tiene que hacerse más investigación.

c) Antena para interenlaces

Son necesarios para intercomunicar lugares vía enlace intersatelitales, estos enlaces eliminarán la operación de estaciones terrenas intermedias, permitiendo enlaces ininterrumpidos. Los tipos de antenas a emplear son la antena reflectora y la de arreglo de fases, así como interenlaces via rayo laser (ver fig. 1.2).

DISEÑO DE LA ANTENA DEL SATÉLITE Y PRUEBAS

Antes de colocar en órbita al satélite, deben realizarse pruebas estrictas de todo tipo, incluyendo intermodulación pasiva para garantizar su funcionamiento el mayor tiempo posible.

2.1.2.2.1.2 SUBSISTEMA DE COMUNICACIONES/REPETIDORES

Esencialmente está constituido por el conjunto de repetidores de microondas o transpondedores que constituyen la carga útil del satélite para una o varias bandas de frecuencias.

La carga consta de lo siguiente:

- Transpondedores, cada uno de ellos cuenta con un receptor de banda ancha (generalmente de 500 MHz o menos), constituido por un amplificador de bajo ruido (ABR) y un convertidor de frecuencias que traslada la frecuencia alta de recepción a una frecuencia más baja. Un caso particular es el receptor activo que permite reutilizar frecuencias por medio de distintas polarizaciones. Los transpondedores más complejos pueden incluir detección de señales, demodulación, demultiplexación, remodulación y ruteo de mensajes. El ancho de banda del transpondedor acomoda varios canales de 36, 54, 72 o 108 MHz., según se ejemplifica en el plan de frecuencias del Satmex5.
- Un demultiplexor que por medio de filtros separa las señales de acuerdo al ancho de cada transpondedor que va de 27 a 40 MHz. La ganancia necesaria para cada transpondedor se ajusta

por medio de unidades de control de ganancia (atenuadores variables).

- Un amplificador de potencia denominado "HPA" que emplea un TWT (tubo de ondas progresivas (es la opción para operar en una amplia gama de frecuencias con gran potencia) o bien emplea amplificadores de estado sólido o "SSPA" (su MMIC o "microwave monolithic integrated circuit" que es más barato, presenta muy buena linealidad y gran desarrollo por lo que casi compite con el TWT en frecuencias no muy altas).

Los principales fabricantes de TWTA's en orden de importancia son los siguientes:

- a) Hughes en los Estados Unidos.
 - b) AEG y Thomson en Europa.
 - c) NEC y Toshiba en Japón.
- Un multiplexor de salida que reúne, sin revolver, a todas las señales de los distintos transpondedores y envía la portadora hacia la antena de transmisión del satélite.

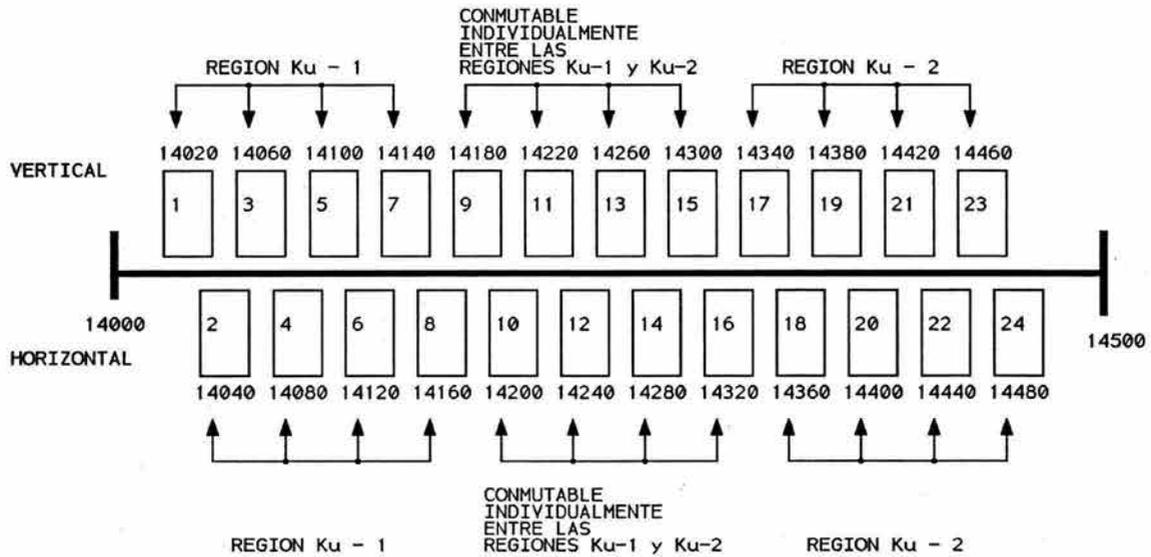
La presencia de varios transpondedores en el satélite operando a altos niveles de potencia conduce a problemas de intermodulación (interferencia entre señales); el objeto de operar cerca de la saturación es el alcanzar una mayor eficiencia, sin embargo no debe rebasarse la región lineal del amplificador para evitar al máximo la intermodulación. En los casos de alta potencia y que la antena incluye los dos dispositivos de recepción y transmisión puede darse un contacto imperfecto entre ellos y además generarse una respuesta no lineal indeseable conocida como intermodulación pasiva.

Dependiendo del servicio a que se destine el satélite, se estima el posible tráfico y con ello la banda, ancho de los canales de cada transpondedor, así como las polarización de las señales, es decir, el plan de frecuencias de los enlaces ascendentes y descendentes. Por ejemplo:

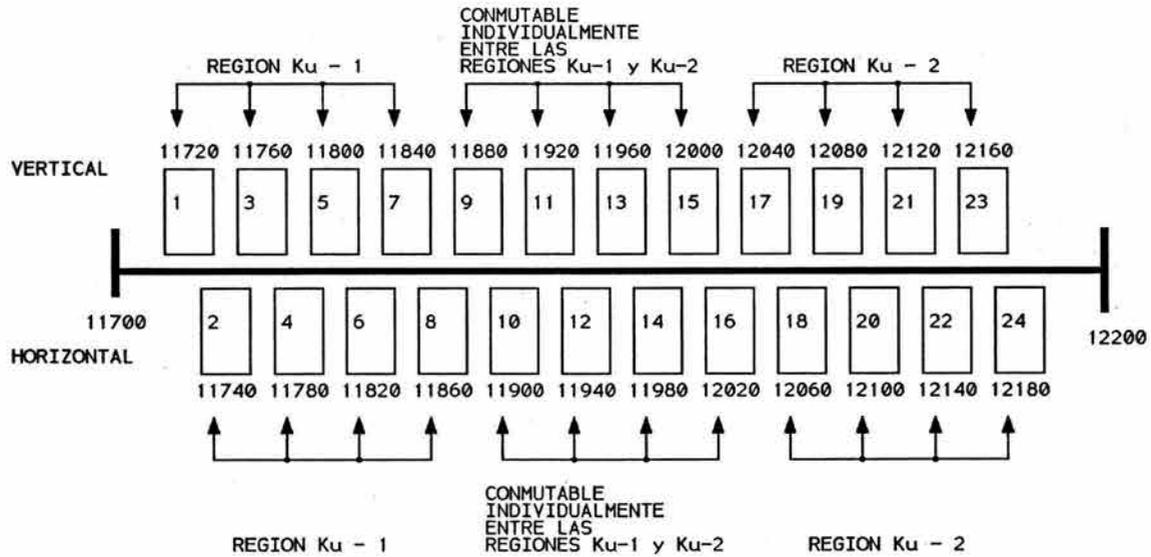
PLAN DE FRECUENCIAS DEL SATELITE SATMEX5

BANDA Ku

ENLACE ASCENDENTE (14 - 14.5 GHz)



ENLACE DESCENDENTE (11.7 - 12.2 GHz)



NOTA: El ancho de cada transpondedor es de 36 MHz., y el espaciamento entre ellos de 40 MHz.

2.1.2.2.1.3 SUBSISTEMA DE ORIENTACIÓN, ÓRBITA

Los satélites geoestacionarios se ubican en el plano del ecuador a una altitud de 35,767 km., que les confiere la característica de geoestacionarios. Las construcciones más comunes son las cilíndricas o estabilizadas por giro y las triaxiales que se estabilizan mediante tres masas inerciales colocadas a lo largo de tres ejes, según se muestra en las figuras 2.12 y 2.14:

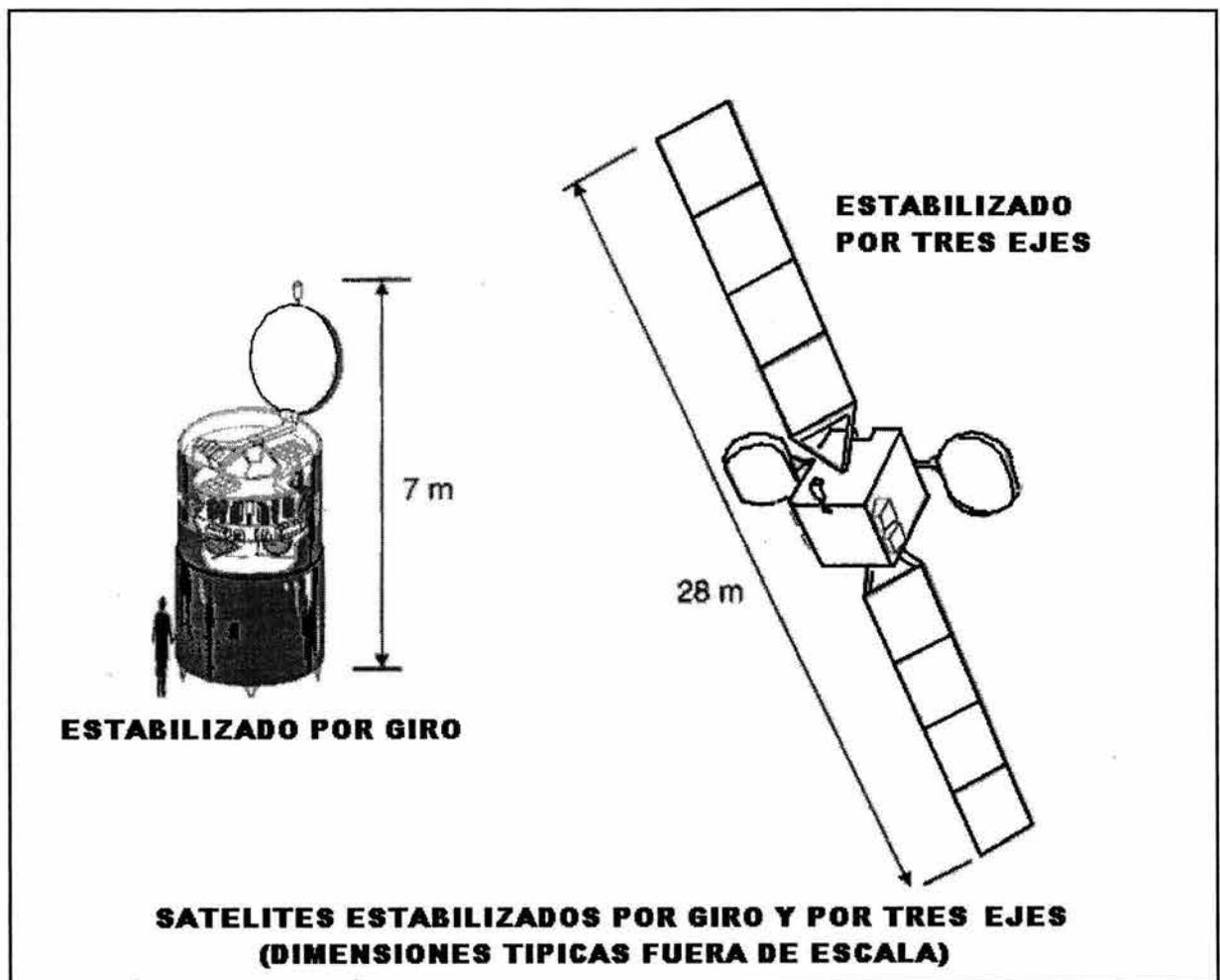


FIGURA 2.12 TIPOS DE ESTABILIZACION SATELITAL.

El satélite tiende a desplazarse de su órbita inicial básicamente por:

a) la rotación que se le impone (que de acuerdo con las ecuaciones de Kepler ocasiona una modificación continua en la órbita) y,

b) las influencias gravitatorias de la luna y el sol que generan un cambio cíclico, además,

c) la misma tierra que al no ser esférica produce una atracción no exacta hacia el centro del planeta, y en consecuencia perturba tangencialmente la órbita ocasionando una deriva en la longitud hacia el este o hacia el oeste hacia las posiciones 75 E y 105 W (cementeros espaciales), dependiendo de su posición orbital; por último también afecta,

b) el viento solar que modifica la órbita circular y altera continuamente la longitud y la orientación. Por último las radiaciones de diversas fuentes como, viento solar, la energía térmica que refleja la tierra (albedo) e incluso la energía radiada por las antenas.

Como resultado de esas interacciones el satélite varía continuamente la latitud y longitud en la que se encuentra y tiende a salirse mediante dos derivas principales:

- Desplazamiento este - oeste a partir de su posición inicial dada por la longitud y originada en el hecho de igualar la velocidad de rotación del satélite con la de la tierra. El resultado con el paso del tiempo es un incremento en la distancia radial. Éste desplazamiento es provocado básicamente por la no esfericidad de la tierra.
- Desplazamiento norte - sur a partir del plano ecuatorial. El plano del satélite normalmente tiende a "caer" del norte hacia el sur. Éste desplazamiento es ocasionado básicamente por la atracción solar.

Toda posición orbital tiene un cubo de tolerancia de 75 x 85 km., dentro del cual el satélite visto desde la tierra, tiene un movimiento en forma de 8. (Ver figura 2.13). Las alteraciones se corrigen ciclicamente mediante pequeños cohetes propulsores que, al consumir su combustible, determinan la vida útil del satélite.

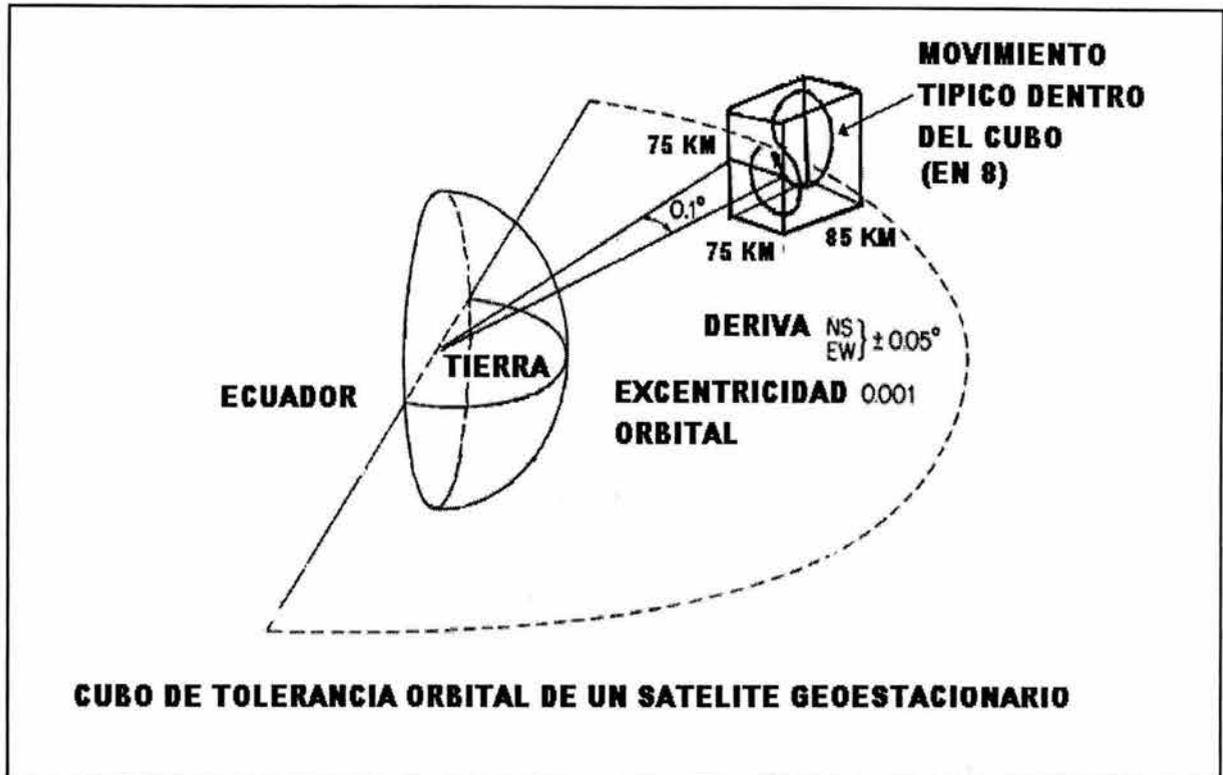


FIGURA 2.13 CUBO DE TOLERANCIA DE LA ORBITA DEL SATELITE.

El subsistema de orientación controla el apuntamiento de la huella del satélite, tanto autonomamente como por medio del centro de control del satélite. También lo mantiene dentro del cubo espacial orbital que se le ha asignado. Para ello cuenta con sensores de giro traxial, de ángulo de incidencia del sol y de tierra estático que activan los impulsores o cohetes previamente mencionados, ruedas de momento y torque magnético etc., una vez que han sido detectados los errores de posición. El mayor consumo de combustible lo ocasionan las correcciones Norte - Sur.

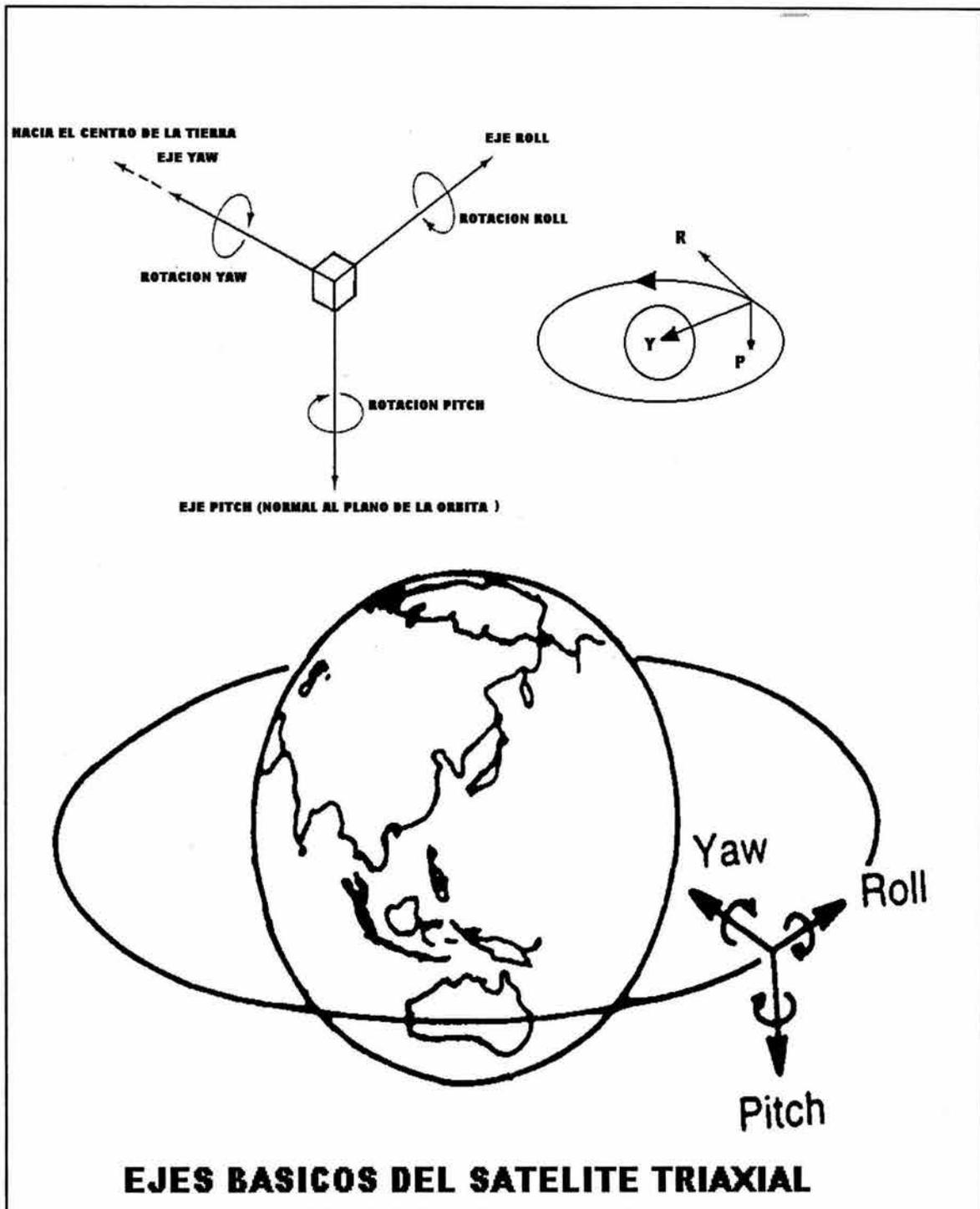


FIGURA 2.14 EJES DE ESTABILIZACION TRIAXIAL.

2.1.2.2.1.4 SISTEMA DE PROPULSIÓN

Es un conjunto de cohetes con bipropelante hipergólico que se emplean desde la colocación en órbita de transferencia del satélite (maniobras de apogeo) y para corregir las desviaciones o deriva que ocurre en su órbita geoestacionaria, es decir para corrección norte - sur, este - oeste y de orientación, giro y nutación. Básicamente de la duración del combustible se deriva la vida útil del satélite, el cual gasta cerca del 80% para alcanzar la órbita definitiva y un 20% para su posterior operación y deorbitación. A continuación se indican los principales componentes del sistema para un satélite triaxial:

- 1 motor de apogeo,
- 4 impulsores para las maniobras este / oeste,
- 4 impulsores axiales
- 4 impulsores para las correcciones norte / sur

Hasta hace poco los sistemas eran bipropelentes, con dos tipos de gases que combustionan, por ejemplo: como combustible Monomethylhidrazina y como oxidante para producir la combustión el tetroxido de nitrógeno, ambos presurizados por un gas inerte como es el helio.

Actualmente se ha iniciado el empleo combinado de sistema bipropelente con un sistema eléctrico como el XIPS (Xenon Ion Propulsion System) que mediante campos eléctrico/magnético de microondas o bombardeo de electrones, ioniza un gas convirtiéndolo en plasma que se expulsa con potencia media (ver figura 2.15). La ventaja es que se obtiene una reducción en la masa del combustible necesario lo cual se puede aprovechar para llevar más equipamiento o más combustible para una mayor duración del satélite.

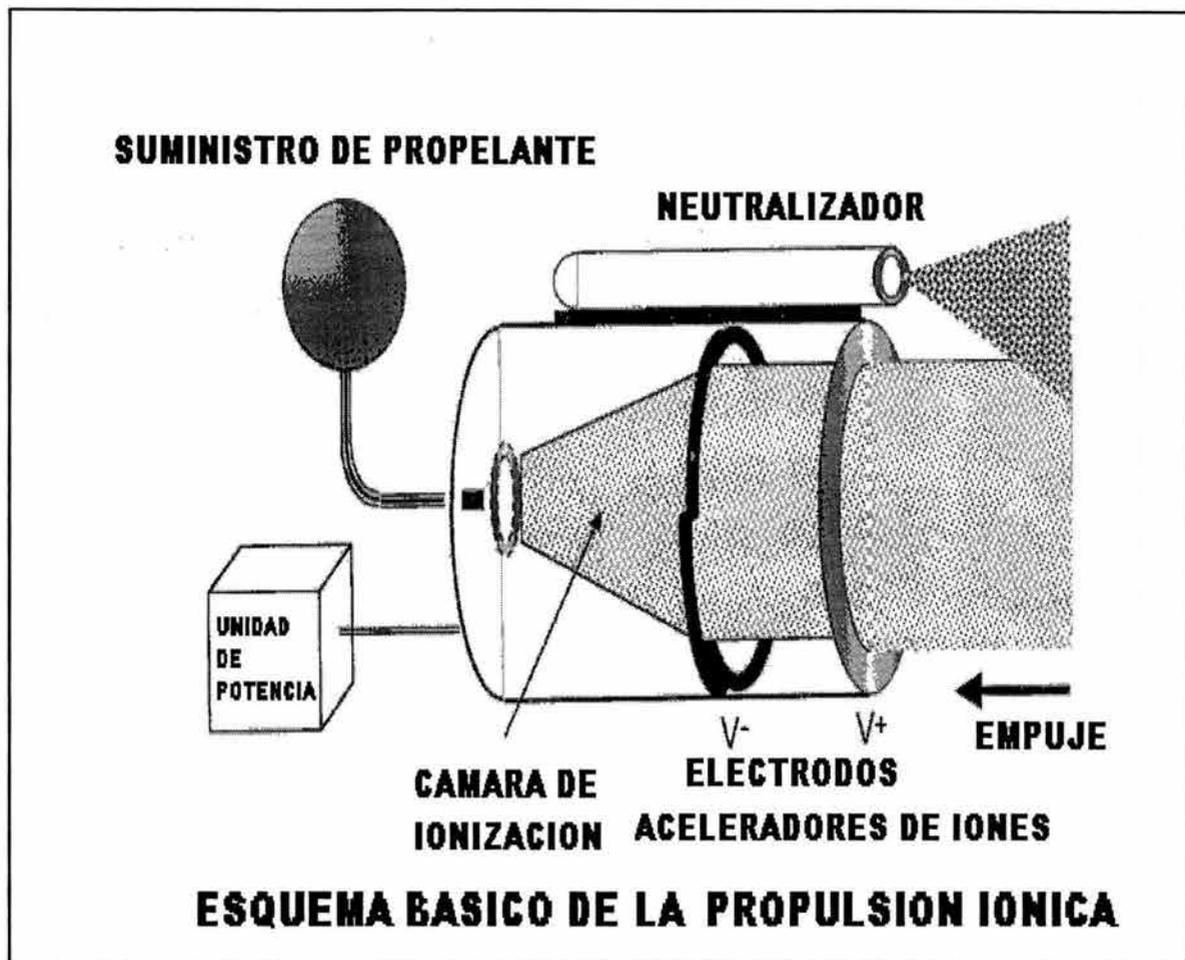


FIGURA 2.15 LA PROPULSION IONICA ALARGA LA VIDA DEL SATELITE.

Aproximadamente cada 14 días los procesadores de control y potencia a bordo del satélite efectúan alrededor de 22 maniobras norte-sur, al cruzar los nodos de la órbita para corregir su inclinación, con duración de 3 a 7 horas (maniobras denominadas XIPS o Xenon Ion Propulsion Subsystem). La estación de control en tierra supervisa e interviene en caso necesario.

2.1.2.2.1.5 SUBSISTEMA DE CONTROL TÉRMICO

Las superficies del satélite reciben radiación solar directa que afecta según su ángulo de incidencia y radiación reflejada por la tierra (esta radiación se denomina albedo y en el caso de los satélites geoestacionarios no se toma en cuenta), además de radiación infraroja de otras fuentes; además experimentan choque térmico con la presencia de eclipses.

Debido a lo anterior, el satélite debe soportar temperaturas extremas pues el sol, dependiendo de las características de la superficie expuesta, puede calentarla sobrepasando los 150 °C y la sombra puede enfriarla de inmediato a menos de -100 °C, mientras que la temperatura de operación de sus elementos más importantes debe conservarse en lo siguiente:

- Componentes y circuitos electrónicos dentro del rango de -10 a 60 °C,
- Celdas solares entre -100 y 100 °C,
- Combustible de 7 a 35 °C.
- Sensores diversos de -20 a 45 °C.

Dado que es de vital importancia para el satélite que los elementos del satélite operen dentro de los límites de temperatura preestablecidos, es extraordinariamente importante la adecuada selección de los materiales de antenas, superficies diversas de su estructura, sus aislamientos e intercambiadores térmicos y sus acabados.

Para controlar la temperatura se emplean por lo general tanto radiadores pasivos como activos:

- recubrimientos de baja conductividad/expansión térmica como son capas de Mylar y películas de Kapton cubiertas con aluminio depositado al vacío,

- disipadores o radiadores con líquidos especiales para intercambio calorífico,
- cobertores multicapas,
- calentadores, ductos y aletas disipadoras,
- pintura negra, blanca, de aluminio y color oro para estructuras internas y superficies diversas con relaciones específicas de emitancia/absorvencia para cada sección así protegida.
- espejos de silicio fundido con fondo de plata o reflectores solares ópticos que se colocan en las caras menos afectadas con variaciones térmicas de los satélites triaxiales (caras norte y sur).

Cuando las temperaturas de operación no se cumplen, se corren los riesgos de degradación del servicio y de acortamiento de la vida útil del satélite.

2.1.2.2.1.6 SUBSISTEMA DE TELEMETRÍA, COMANDO Y RANGO

Es un subsistema redundante que opera en banda C, transmitiendo mediante las antenas de comunicaciones y omnidireccional comandos de control del satélite a velocidades muy bajas que la telemetría misma verifica antes de su ejecución pues se puede dañar al satélite en caso de error.

Telemetría

Permite monitorear voltajes, temperaturas y aceleraciones con el fin de determinar el buen funcionamiento de todos los subsistemas del satélite; por ejemplo, en los satélites mexicanos siempre existe una Unidad de telemetría (TEU) activa que recibe información de 512 sensores y la envía mediante subportadoras de 32 kHz tanto al transmisor de telemetría (que la envía a su vez hacia el centro de control en tierra), como al Procesador de Control del satélite (para control de operación automática incluyendo uso de algoritmos de falla); La otra misión de la telemetría es supervisar la correcta

recepción de comandos del satélite.

Comandos

Este subsistema inicialmente recibe instrucciones o comandos por cable desde el acceso de prueba y la conexión con el vehículo de lanzamiento. Posteriormente al estar en órbita recibirá comandos desde tierra que incluyen códigos de acceso/seguridad y los generados internamente por el procesador de control del satélite. Cuando son enviados desde tierra la transmisión se hace mediante secuencias de tonos modulados en frecuencia dentro de las portadoras de subida y los comandos no se admiten sin su validación correspondiente, el satélite confirma los comandos regresando hacia la estación de control los tonos modulados en fase.

Rango

Permite calcular la distancia entre la estación terrena y el satélite por medio del retraso de una señal que viaja al satélite y regresa a la estación terrena.

2.1.2.2.1.7 SUBSISTEMA DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Debido a la inclinación de la tierra el sol ilumina buena parte del año a los paneles solares que alimentan directamente a los equipos electrónicos a bordo del satélite, sin embargo, el plano ecuatorial en el que se ubican los satélites también cambia su posición a lo largo del año y tiende a colocarse en el mismo plano de la órbita terrestre para los equinoccios de primavera y otoño; con dicho cambio la sombra de la tierra empieza a afectar a los paneles 21 días antes de cada equinoccio y el eclipse es total los días 21 de marzo y 21 de septiembre, a partir de él, la sombra seguirá afectando 21 días más (ver fig. 2.16). Es conveniente que las longitudes del satélite estén más al oeste de la estación terrena, pues el eclipse ocurre durante la noche y afecta a un número menor de usuarios.

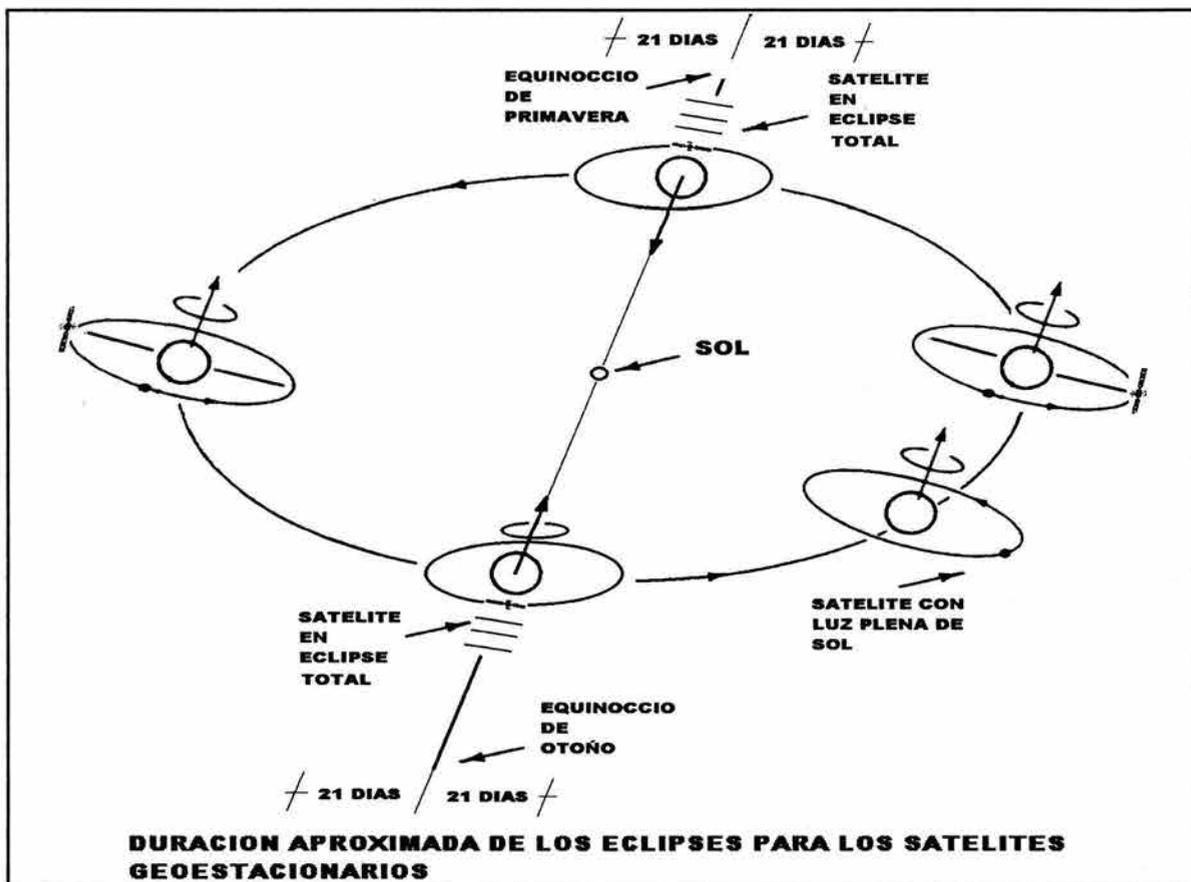


FIGURA 2.16 DURACIÓN DEL ECLIPSE PARA EL SATÉLITE GEOESTACIONARIO

Paneles solares

Actualmente se prefiere construir los paneles con celdas de arseniuro de galio/germanio en lugar de silicio para alcanzar más fácilmente eficiencias del 21.6% y una vida útil de al menos 15 años. La potencia eléctrica del satélite depende del área de los paneles solares. Para los satélites estabilizados por giro se estima que producen alrededor de 950 W al inicio y unos 750 W para el final de su vida útil.

Las celdas solares también estarán expuestas a un viento solar variable en intensidad que tiende a flexionarlas y las agrede con partículas diversas de hasta 1 GeV, protones, electrones, rayos cósmicos y galácticos, además de los rayos ultravioleta, por lo que gradualmente se degrada su funcionamiento, además de que ocasionalmente puede ocurrir un daño definitivo tanto en celdas como en los demás dispositivos electrónicos por una eventual corriente estática en exceso que el viento solar genera ciclicamente cada 11 años y que obliga a emplear buenos blindajes y tierras para la circuitería (Un problema de tierras inadecuadas y corriente adicional estática pudieron haber afectado al Solidaridad I quemando circuitos).

Una tormenta solar cíclica con polaridad contraria a la encontrada en las altas capas de la atmósfera puede ser en especial dañina para los satélites de órbitas bajas, ya que sería atraída y se impactaría hacia la tierra con toda su magnitud; como consecuencia la atmósfera se expandiría más allá de sus límites normales y se incrementaría la velocidad de arrastre para los satélites de órbitas bajas, y la posibilidad de que pierdan su órbita. Otro factor de baja probabilidad en contra de los satélites es el impacto de micrometeoritos.

Con el fin de minimizar los efectos de la radiación diversa actualmente se les ha agregado cubiertas protectoras (Corning microsheet 7940 o OCL cover glass).

Las celdas solares de silicón fueron desarrolladas por los laboratorios Bell en 1953 y empleadas en el satélite VANGUARD I en 1958 (ver figura 2.17).

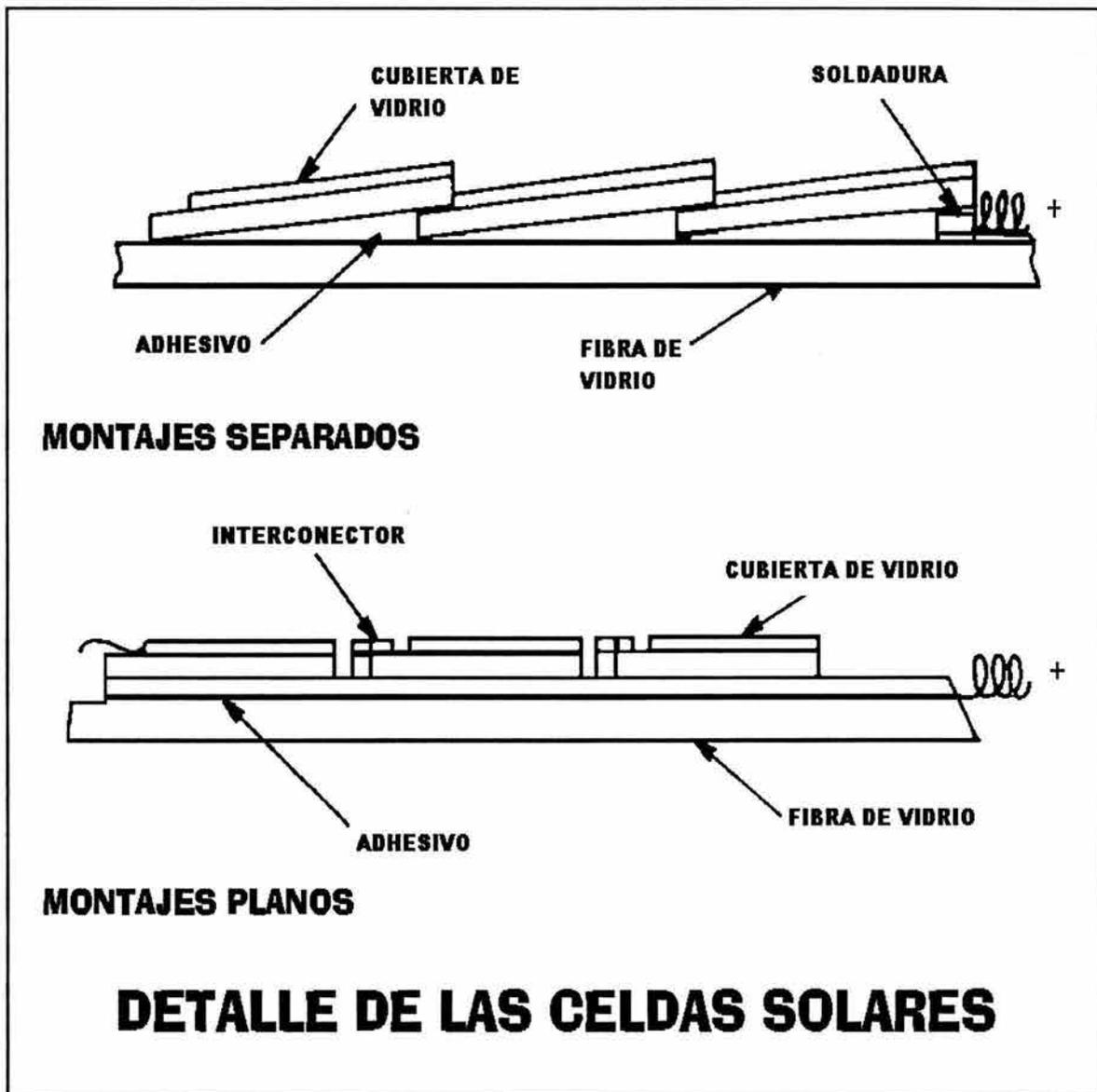


FIGURA 2.17 CELDAS SOLARES DE SILICON.

Su eficiencia era del 4%: actualmente se emplean celdas de Arseniuro de Galio con una eficiencia de alrededor del 15% o mayor, según se deduce de las figuras 2.18 y 2.19:

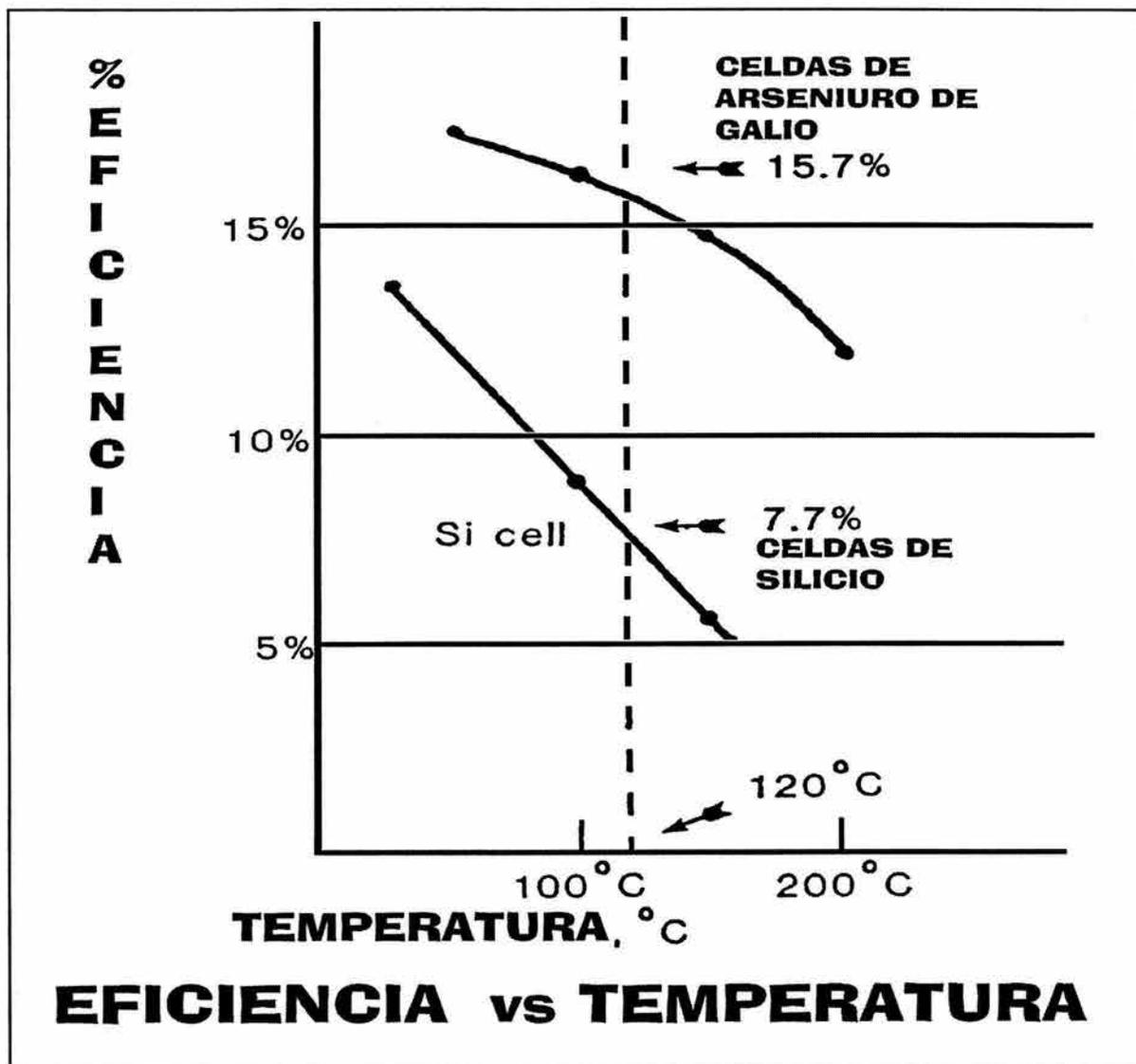


FIGURA 2.18 EFICIENCIA DE LAS CELDAS SOLARES.

A continuación se muestra la nueva tecnología de 4 capas que permite mayor eficiencia. En laboratorio se ha logrado 32.3% de eficiencia.

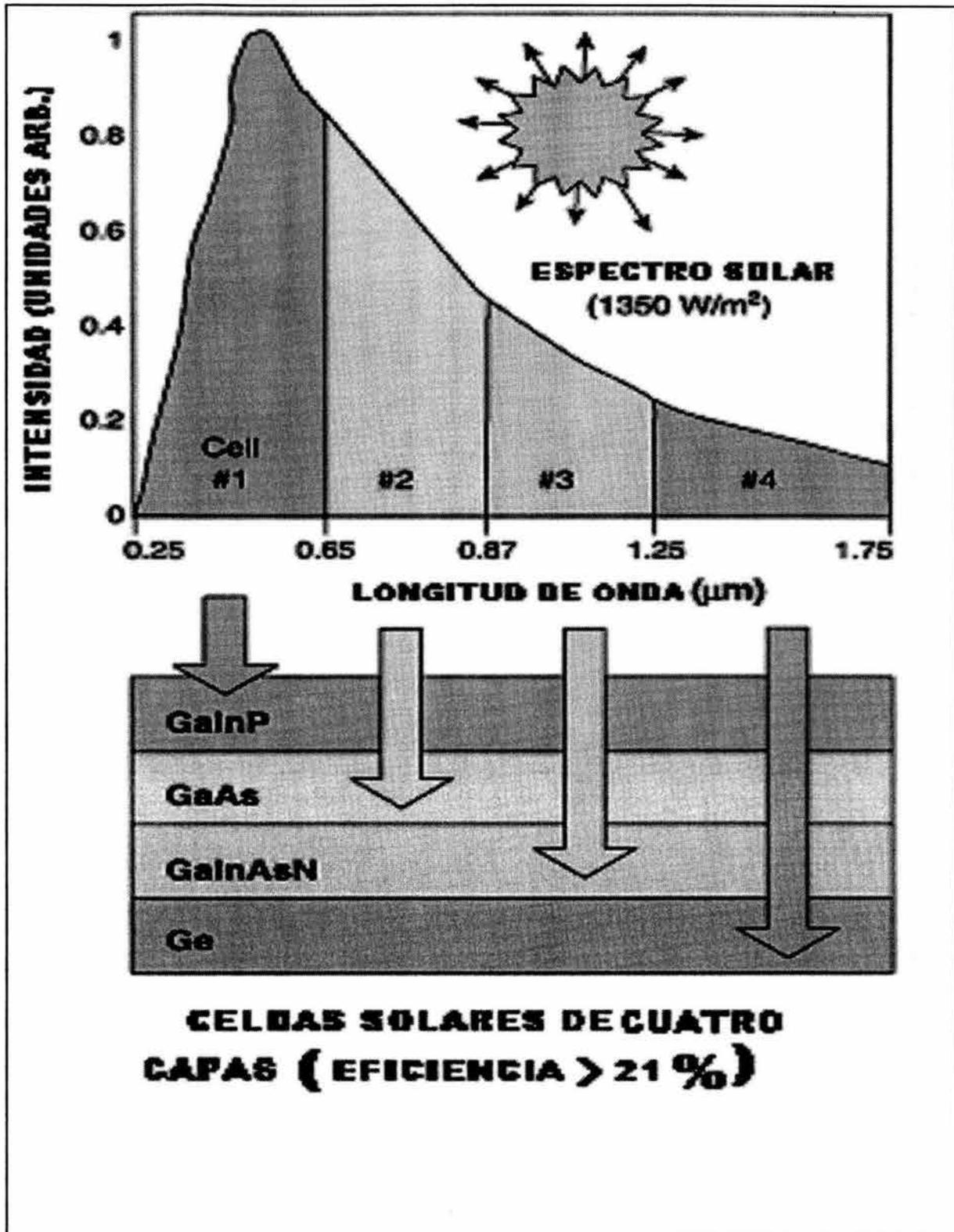


FIGURA 2.19 CAPAS DE LAS CELDAS SOLARES.

baterías

Las baterías abordo se emplean desde que el satélite se posiciona en su órbita de transferencia que marca el inicio de las maniobras para su colocación en su órbita definitiva: posteriormente una vez desplegados los paneles solares, se cargan a partir de la energía solar y alimentan de forma automática y regulada a los subsistemas que así lo requieran cuando las celdas solares no suministren la energía suficiente. Este proceso se realiza durante toda la vida útil del satélite y debe preverse la degradación que puedan sufrir todos los elementos implicados.

TECNOLOGÍAS PREFERIDAS PARA LAS BATERIAS SATELITALES

Con celdas de Niquel - Cadmio (Ni-Cd)

Es una tecnología madura que la NASA ha probado con baterías de 50 AH, con duración comprobada de 27000 ciclos de carga- descarga a un nivel de descarga del 25% a temperatura de 20°.

Con celdas de Niquel Hidrógeno (Ni-H₂)

Son la mejora sobre las baterías de Niquel-Cadmio, con menor peso y mayor duración, mucho mayor tolerancia a la sobrecarga, abuso y sobredescarga, características muy buenas que las hacen las favoritas actualmente.

Nuevos desarrollos

Con celdas de Plata-hidrógeno se tiene una alta energía específica en el rango de 75 a 80 Wh/kg y densidad de energía en el rango de 50 a 60 kWh/m³; ha sido probada en laboratorio con ciclos acelerados de carga-descarga sin problemas.

Con celdas de litio se alcanza una densidad de energía de 100 Wh/kg, de 160 a 200 con cambios químicos y vida de 300 a 500 ciclos. Requiere de más pruebas para su calificación espacial.

Con celdas de sodio actualmente se tiene una densidad de energía de 110 Wh/kg y se requiere mejoras para alcanzar de 160 a 200 con cambios en configuración; teóricamente tiene una energía específica de 700 Wh/kg. Requiere de más pruebas para su calificación espacial.

2.1.2.2.1.8 SUBSISTEMA ESTRUCTURAL

Da el soporte a todos los subsistemas del satélite (ver fig. 2.20). El soporte primario está conformado por la envoltura (aleación de aluminio y compuestos de grafito/epoxy) que contiene a casi todos los subsistemas con excepción de las antenas y arreglos solares. Los elementos estructurales secundarios son de acero o titanio y dan soporte al subsistema de antenas, paneles solares, baterías, sensores y equipo de control térmico.

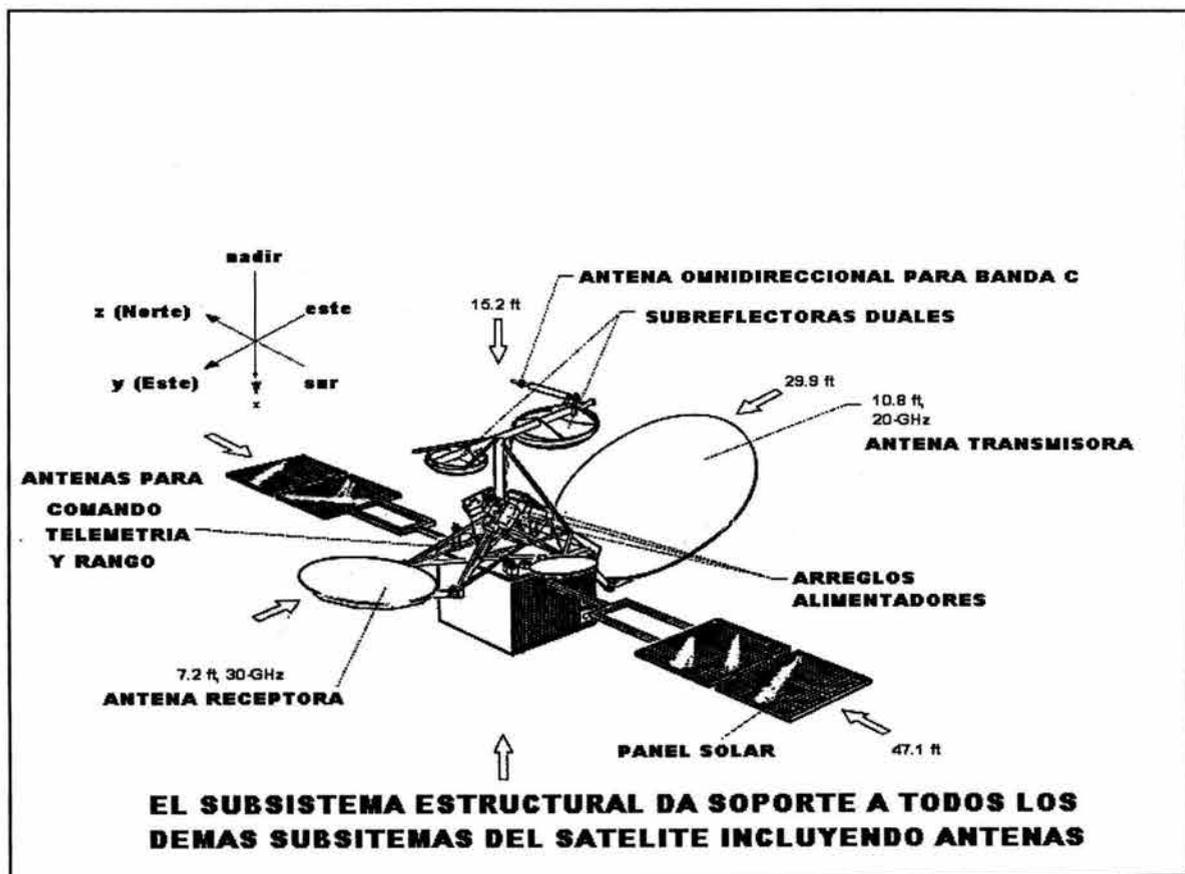


FIGURA 2.20 SUBSISTEMA ESTRUCTURAL DEL SATELITE.

PRUEBAS DE CALIFICACIÓN ESPACIAL

Dado que el espacio exterior, para todo tipo de órbitas de satélites, es un ambiente extremadamente hostil, en el que las superficies expuestas al sol reciben 1350 kW/m² de calor, mientras que las superficies en la sombra tienden al cero absoluto y la carga útil debe mantenerse dentro de temperaturas que van de 0 a 60 grados centígrados, todo componente debe seleccionarse por su alta confiabilidad, producto preferentemente de pruebas en ambientes similares al mencionado aquí. Posteriormente al diseñarse el vehículo satelital deben construirse y probarse tres modelos o prototipos que aseguren un buen funcionamiento para períodos que van de 4 a 15 años:

3.4.2 PROTOTIPOS O MODELOS PARA CALIFICACIÓN ESPACIAL	
MODELO MECÁNICO	Incluye pruebas a todas las partes mecánicas y estructurales del vehículo satelital. Las pruebas deben asegurar que toda parte móvil del satélite operará correctamente durante el período de vida esperado en el vacío con las variaciones térmicas previstas, vibraciones y fuerzas G que se darán al despegue y en operación en órbita.
MODELO TÉRMICO	Realiza pruebas térmicas de funcionamiento de todos los componentes y sistemas electrónicos de la carga útil, deformaciones de antenas y desplazamientos de elementos estructurales de soporte mediante poderosos calefactores que proveen temperaturas superiores a los 100 grados centígrados. También se hace descender la temperatura a menos 100 grados centígrados para simular los cambios de temperatura en órbita.
MODELO ELÉCTRICO	Realiza pruebas de buen comportamiento eléctrico de los componentes electrónicos, simulando el ambiente en órbita. Las antenas deben proveer desde el punto de vista eléctrico el ancho del haz requerido, ganancia y polarización deseados.
	Normalmente se prueba por separado varios modelos y uno de ellos se somete a condiciones que sobrepasan los límites establecidos, como 10 grados más del límite o 50% más de carga y fuerzas G, con el objeto de detectar componentes débiles. Además todo elemento esencialmente indispensable para el funcionamiento como son los TWTA van con redundancia que inmediatamente se conmuta en caso de falla.

2.2 TIPOS DE ÓRBITAS

El promotor de la idea de satélites de Telecomunicaciones fue el británico Arthur C. Clarke, miembro de la "Britain's Royal Air Force", quien en 1945 escribió un artículo en el "Wireless World", sugiriendo colocar un satélite a 42,242 km. De altitud para comunicar a casi 1/3 de la superficie terrestre y que, a esa altura el satélite permanecería inmóvil, es decir geoestacionario, pues su período orbital, o tiempo necesario para recorrer una vez su órbita coincide con la duración de un día terrestre. Para esas épocas dicha sugerencia escapaba a los límites tecnológicos con que contaba la humanidad, pues no existía ningún cohete que lograra la velocidad de inyección de 17,000 mph necesaria para alcanzar dicha órbita.

Un satélite permanece en órbita si cumple con determinada velocidad y si dicha órbita está fuera de la atmósfera terrestre, pues ésta lo frenaría poco a poco y caería.

La dinámica orbital de un satélite obedece a las leyes de Kepler, quien fue un astrónomo alemán (1571 - 1630), que pasó su vida analizando el movimiento de los planetas como satélites del sol y concluyó lo siguiente:

- Todo satélite tiene una órbita elíptica y, en ese caso, con centro de gravitación en el sol, el cual también se posiciona en uno de sus focos. El punto más cercano se denomina perigeo y el más alejado apogeo.
- El satélite recorre áreas iguales en tiempos iguales, lo cual implica que el satélite viaja a mayor velocidad en el perigeo y a menor velocidad en el apogeo.
- El cuadrado del período orbital es proporcional al cubo del semieje mayor de la órbita.

Posteriormente Issac Newton confirmaría matemáticamente esos postulados con sus leyes gravitatorias y de movimiento.

De esa manera toda órbita satelital es elíptica, pues una órbita circular es un caso particular en el cual los dos focos están en el centro de la tierra y se cumple la primera ley de Kepler. Las órbitas típicas se ubican antes, entre y después de los dos cinturones de radiación Van Allen. Estas se denominan como bajas, medias y geoestacionarias según se muestra en la fig. 2.21:

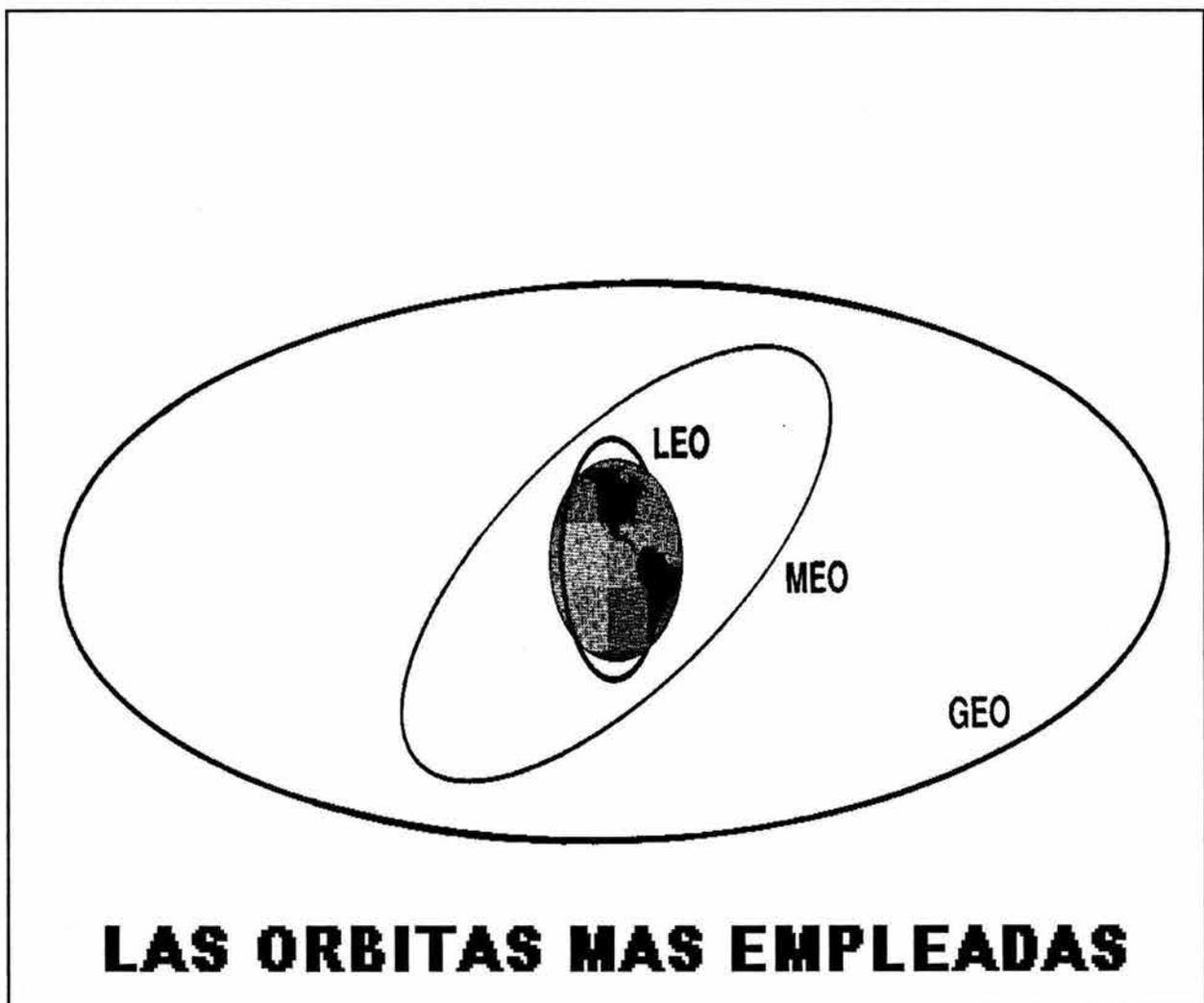


FIGURA 2.21 ÓRBITAS TÍPICAS

En los satelites LEO y MEO el sentido de la órbita puede ser positivo o negativo según se observa en la fig. 2.22:

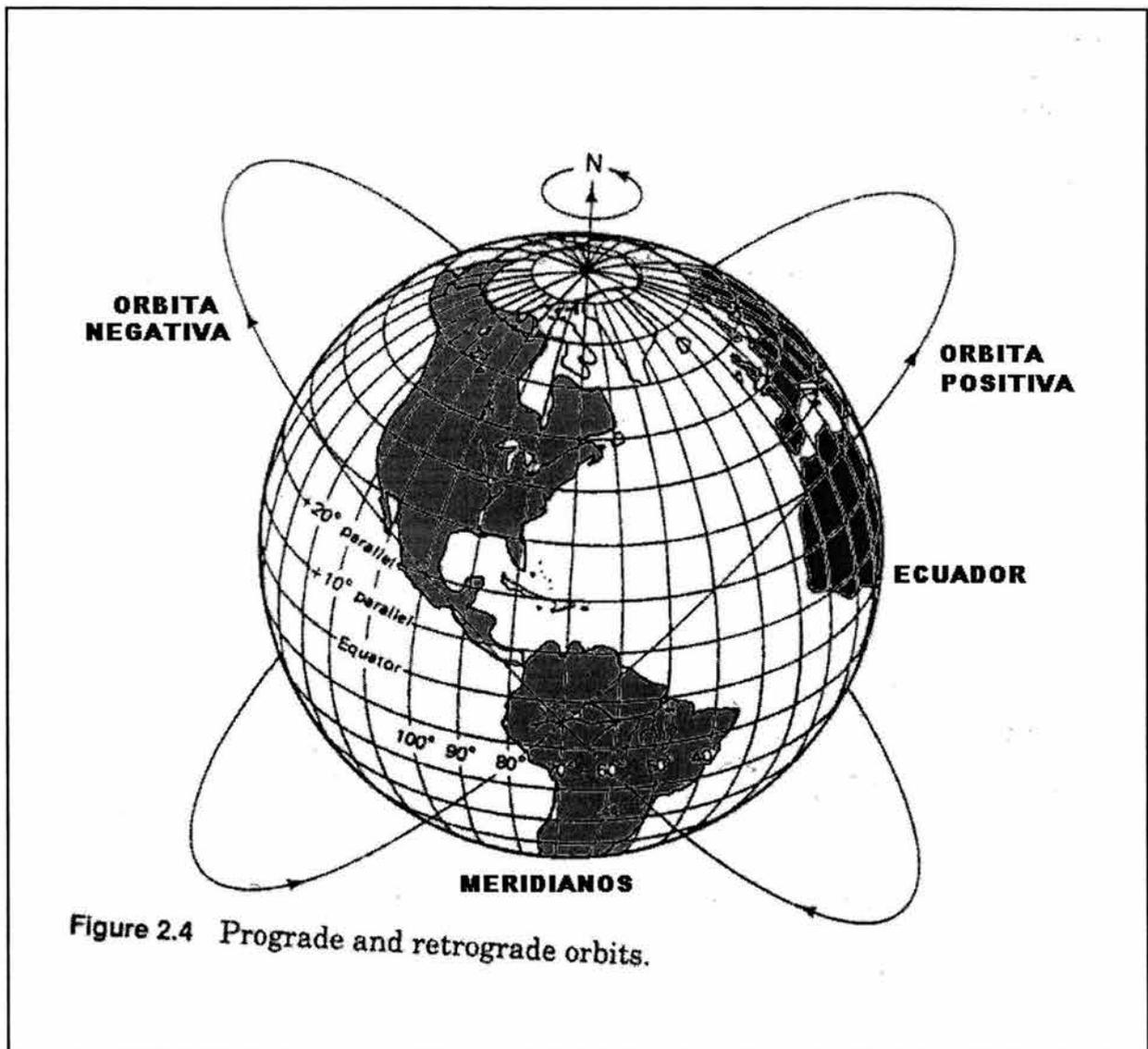


Figure 2.4 Prograde and retrograde orbits.

FIGURA 2.22 SENTIDO DE LAS ÓRBITAS

Los casos particulares clásicos de órbitas son los siguientes:

2.2.1 CIRCULAR INCLINADA

Es empleada por los satélites de órbita baja y de órbitas medias.



FIGURA 2.23 ÓRBITA INCLINADA TÍPICA

En órbita baja (LEO'S o Low Earth Orbiting Satellites), se colocan

satélites de reconocimiento o vigilancia militar, de investigación científica y de observación astronómica a una altura que se determina entre 300 y alrededor de 800 km, dependiendo de su aplicación; dan la vuelta a la tierra en 90 a 100 minutos. Tienen la característica de no cubrir latitudes muy al norte o muy al sur. También se emplean para las constelaciones de satélites de comunicaciones.

Las constelaciones de satélites (figura 2.24), tienen una aplicación muy importante en las comunicaciones móviles y en particular para la localización de vehículos y ayudas a la navegación aérea. Su alto costo en los sistemas de comunicación personal hace pensar que fracasan al competir con los sistemas celulares que cada vez logran mayor cobertura y más bajo costo. Sin embargo se espera un buen mercado con enlaces de alta velocidad para Internet.

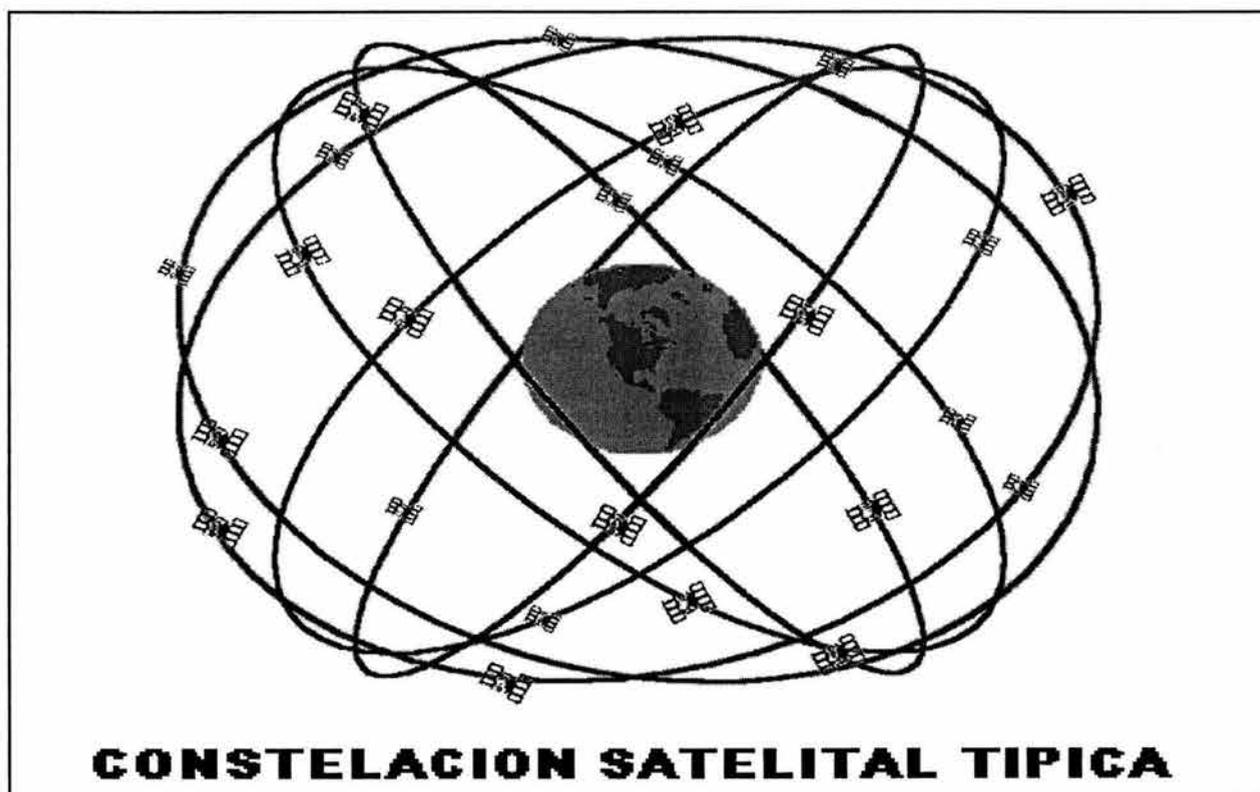


FIGURA 2.24 CONSTELACIÓN SATELITAL TÍPICA

En órbitas medias (MEO'S o medium orbit satellites), se colocan satélites de recepción directa como el sistema Global Positioning System (figura 2.25). Con ellos se forman constelaciones satelitales de cobertura mundial para rastreo de vehículos, monitoreo en manejo de combustibles y líquidos, mensajes bidireccionales mediante terminales fijas o móviles, voz, datos, fax y acceso a Internet. Para los satélites de órbita media la altura se determina de 10,000 a 20,000 km., y dan la vuelta alrededor de la tierra en aproximadamente 120 minutos.

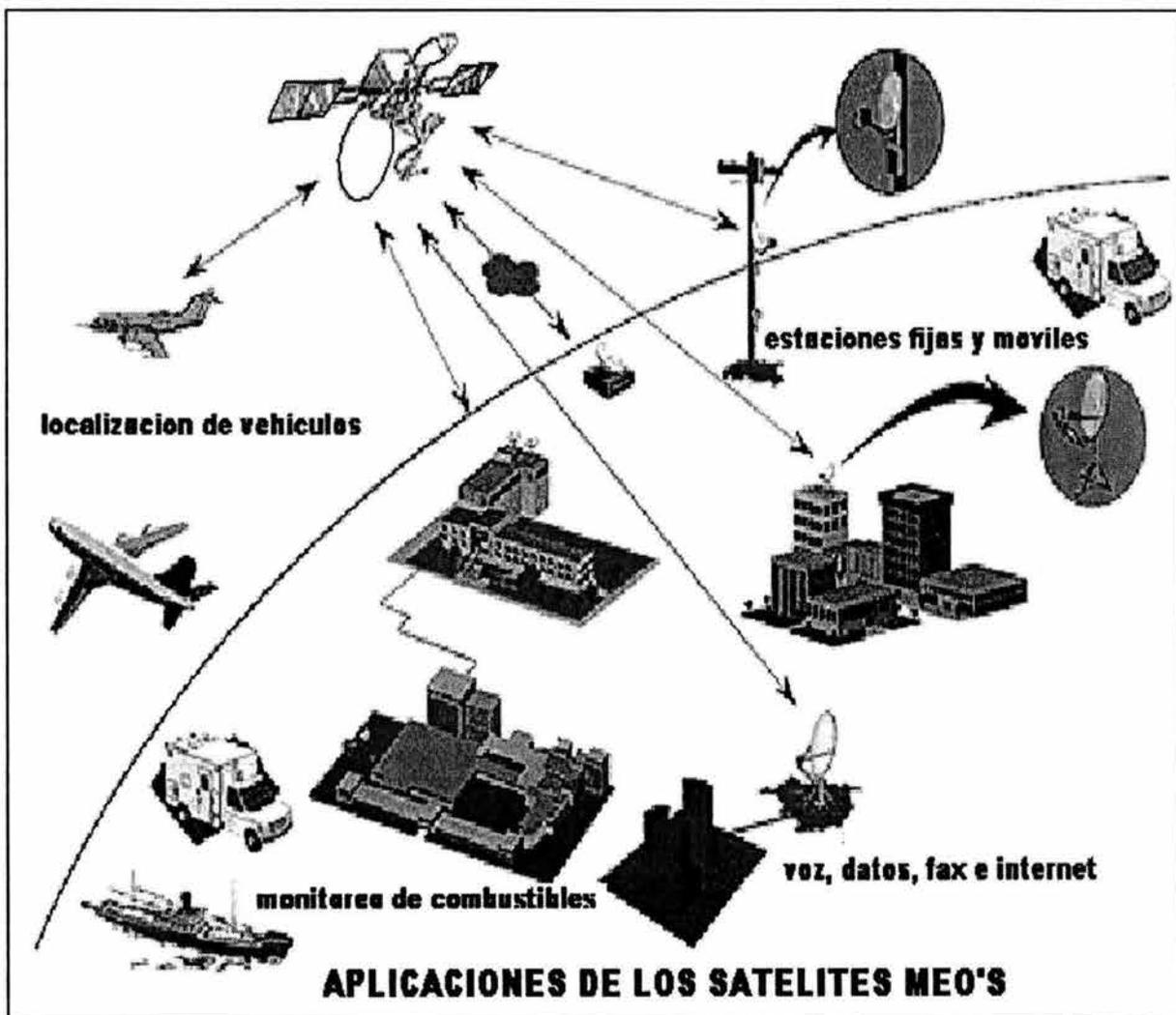


FIGURA 2.25 APLICACIONES DE LAS CONSTELACIONES DE SATÉLITES MEO'S

2.2.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SISTEMA GPS

El sistema norteamericano consta de una constelación de 21 satélites orbitando a 1000 km de la superficie de la tierra en seis planos, (se tiene otros 3 de reserva), y una serie de estaciones terrenas equipados con relojes atómicos ultraprecisos que se sincronizan y permiten la constante actualización de la posición (x_i, y_i, z_i) de cada uno de los satélites dentro del rango de los centímetros en el momento t_i que transmite una señal (figura 2.26).

La posición de un móvil con receptor GPS en tierra (X, Y, Z) en un instante desconocido T es determinada si se supone se reciben simultáneamente cuatro señales distintas provenientes de los satélites defasadas en tiempo d_1, d_2, d_3 y d_4 , viajando a la velocidad de la luz (c) , pues se puede generar un sistema de 4 ecuaciones con 4 incógnitas que nos permite determinar cualquier posición (X, Y, Z) con una tolerancia promedio de 30 m. para un momento T con las ecuaciones:

$$\begin{aligned}(x_1 - X)^2 + (y_1 - Y)^2 + (z_1 - Z)^2 &= c^2 (t_1 - T - d_1)^2 \\(x_2 - X)^2 + (y_2 - Y)^2 + (z_2 - Z)^2 &= c^2 (t_2 - T - d_2)^2 \\(x_3 - X)^2 + (y_3 - Y)^2 + (z_3 - Z)^2 &= c^2 (t_3 - T - d_3)^2 \\(x_4 - X)^2 + (y_4 - Y)^2 + (z_4 - Z)^2 &= c^2 (t_4 - T - d_4)^2\end{aligned}$$

La señal de un satélite es un paquete de datos que contiene la posición y momento exacto donde se originó y que será captada en una posición y momento desconocidos (X, Y, Z, T) .

Las instalaciones de control de este sistema están localizadas en la base de la fuerza aérea de Falcón en Colorado USA. y la tabla de precisión estimada AL 2002 se muestra en la siguiente página, sin embargo, nuevos desarrollos permiten ya una precisión de 3 metros horizontalmente.

SPS (Standard Positioning System)	PPS (Precise Positioning Service)
● 100 m. exactitud horizontal	● 22 m. exactitud horizontal
● 156 m. de exactitud vertical	● 156 m. de exactitud vertical
● 340 nanoseg de exactitud	● 340 nanoseg de exactitud

Para los cálculos se toma en cuenta el retraso que puede ocasionar la ionósfera a la señal pues al ser un plasma compuesto de iones y electrones libres produce diversos efectos sobre las ondas de radio que en este caso dan un retraso en tiempo. El GPS para navegación precisa, corrige burdamente empleando dos señales en distinta frecuencia. Los usuarios normales en cualquier lugar tienen acceso a la opción estandard SPS y sólo los usuarios autorizados pueden contar con GPS opción PPS o mejorada.

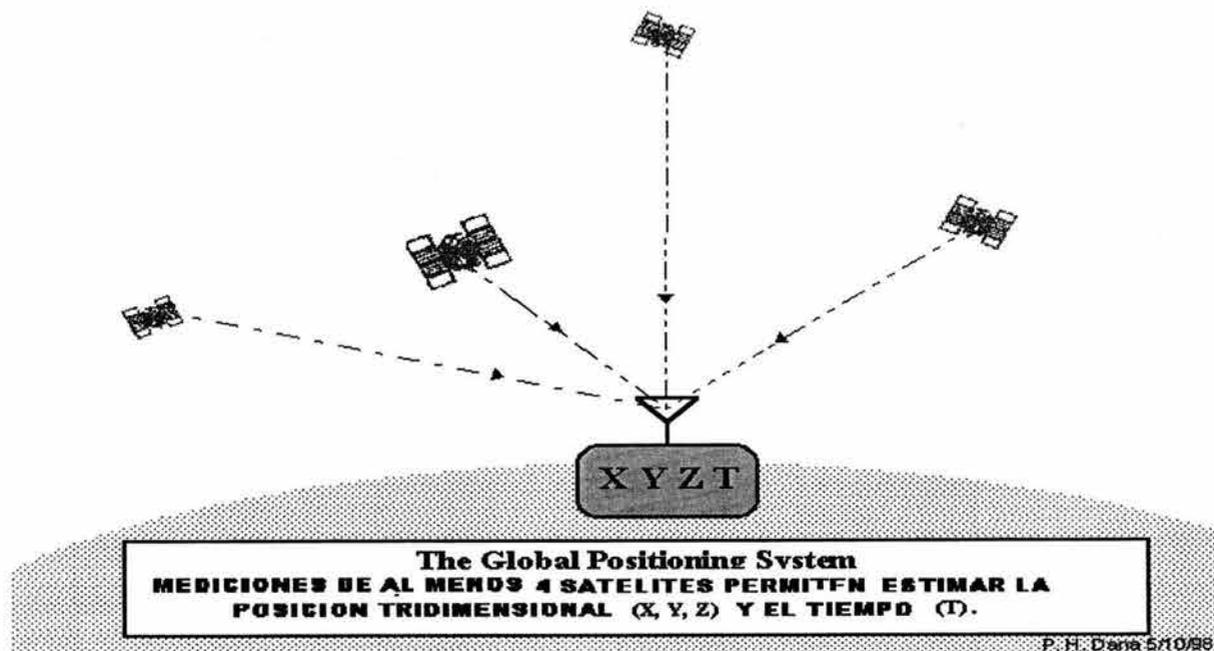


FIGURA 2.26 GPS COMO APLICACION DE LAS CONSTELACIONES DE SATÉLITES MEO'S

2.2.2 ELIPTICA INCLINADA

Este es un caso especial de órbita que es empleada por los satélites rusos como el Sistema Molnilla, según se muestra en la fig. 2.27:

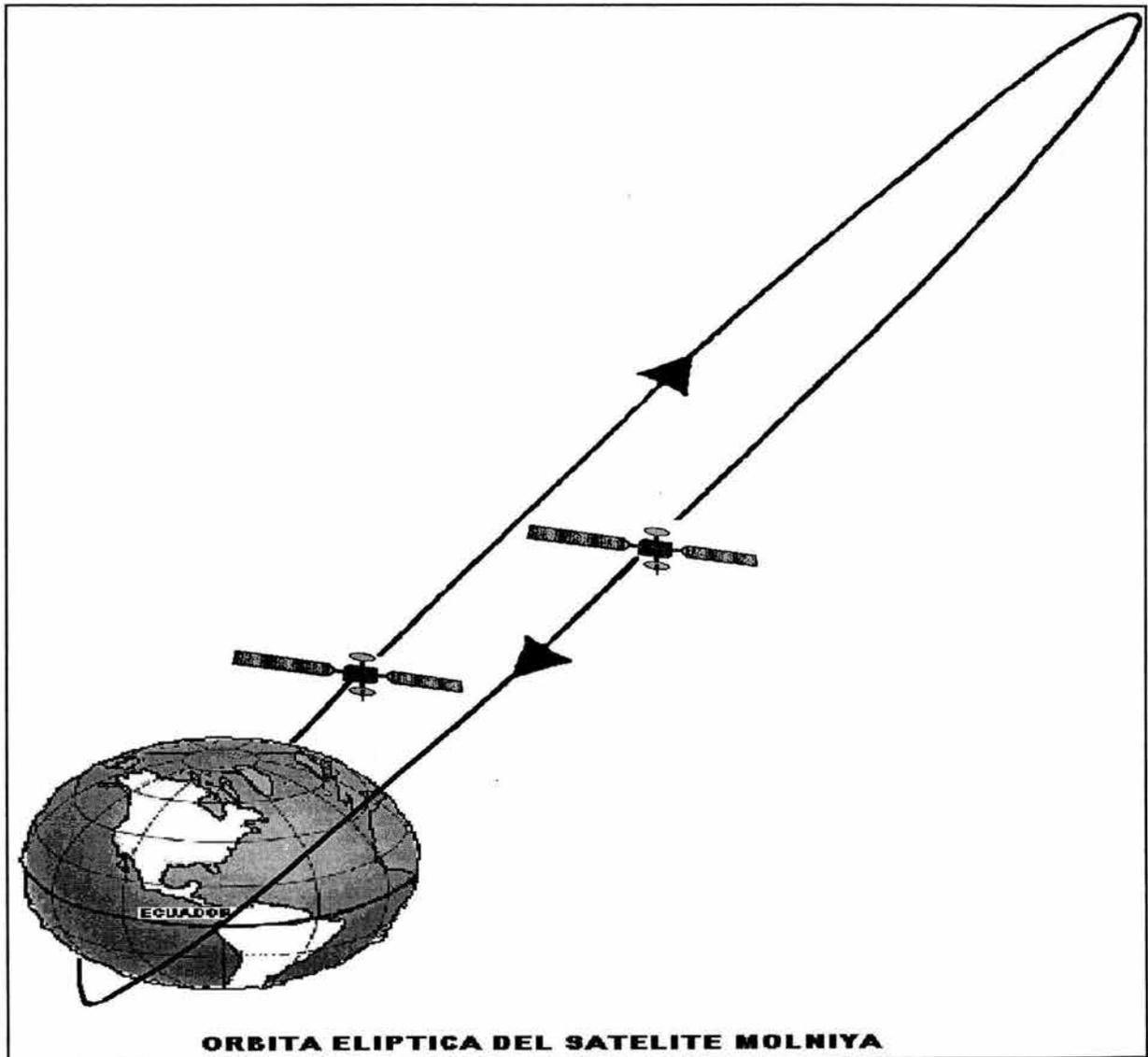


FIGURA 2.27 ÓRBITAS ELÍPTICAS

2.2.3 ÓRBITA CIRCULAR POLAR

Se muestra en la fig. 2.28 con cobertura global con recepción directa (se usó en el sistema Iridium (el cual tuvo fracaso administrativo y fue adquirido por el gobierno estadounidense)).

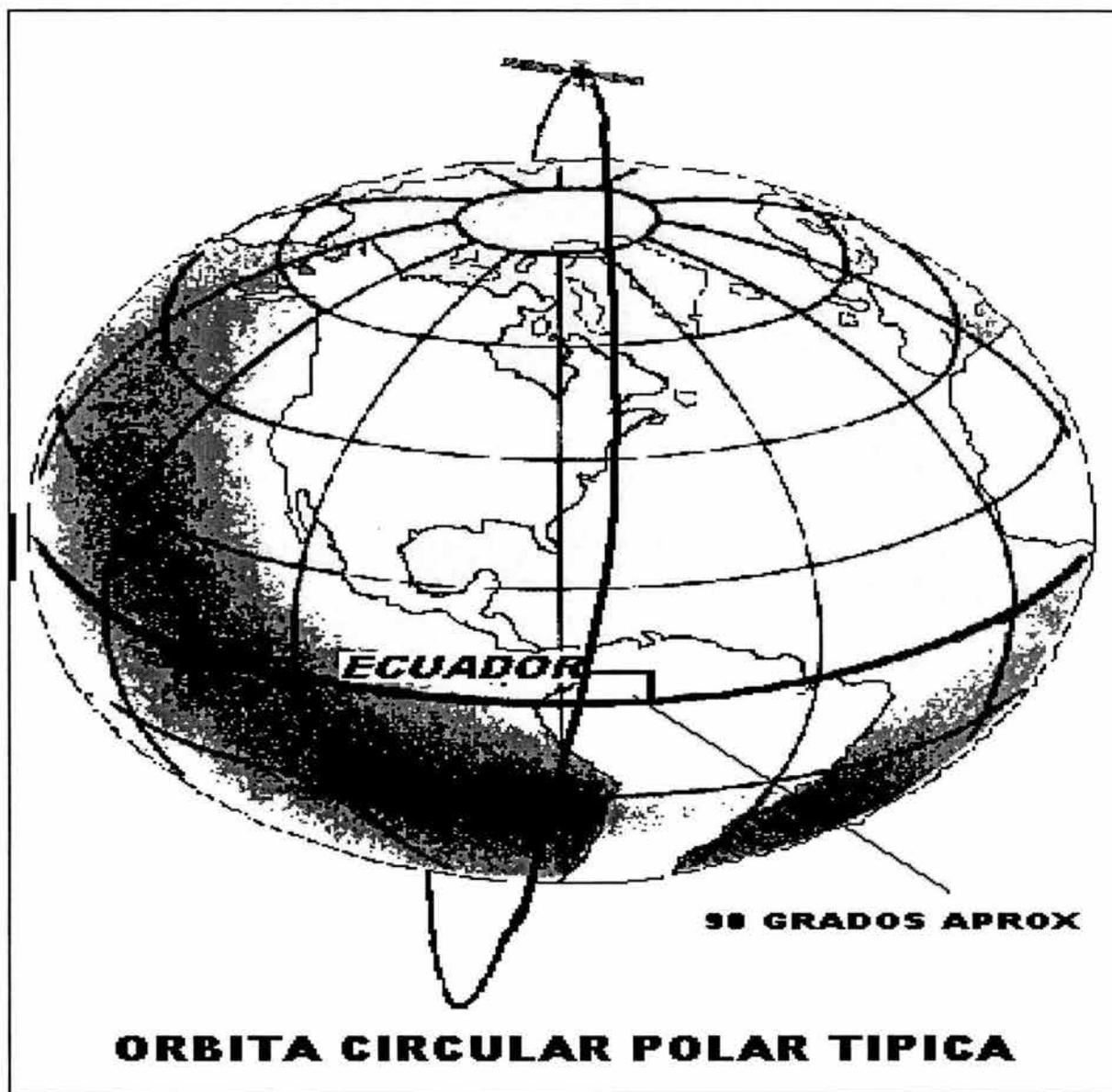


FIGURA 2.28 ÓRBITA CIRCULAR POLAR

2.2.4 GEOESTACIONARIA

La órbita más empleada es sin duda la geoestacionaria (fig. 2.29), propuesta por Arthur C. Clarke en los 40's para cubrir con tres satélites al globo terrestre, con excepción de los polos. Actualmente ocupada por la mayoría de los satélites de comunicaciones, satélites de exploración de recursos terrestres, de transmisión de televisión directa (DTH O Direct To Home)) y por sistemas de satélites trabajando en conjunto para apoyar a las comunicaciones marítimas en todo tipo de condiciones incluyendo las de desastre (Sistema Immarsat), etc., la altura de esta órbita es de 35788 km. Su período de 24 hrs., da origen a su nombre.

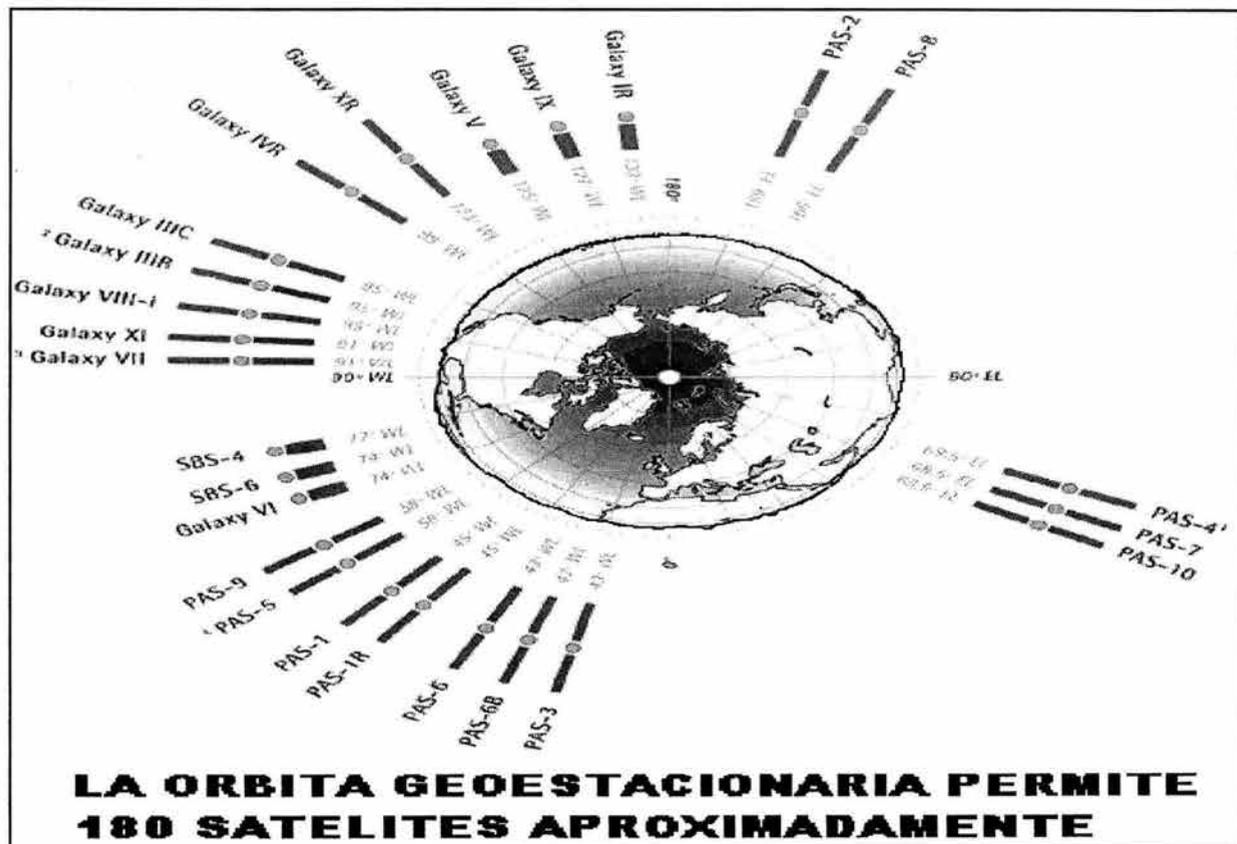


FIGURA 2.29 LA ÓRBITA GEOESTACIONARIA

2.3 POSICIONAMIENTO EN ORBITA DE SATELITES GEOESTACIONARIOS

Los satélites más utilizados en las comunicaciones y la meteorología son los geoestacionarios, que ocupan posiciones orbitales fijas respecto a la tierra en el plano ecuatorial, por lo que desde un punto de vista práctico permanecen inmóviles en el firmamento. Su puesta en órbita se realiza en dos etapas: fase de lanzamiento y fase de inyección en órbita. En la fase de lanzamiento el satélite es colocado en una órbita elíptica denominada de transferencia por el transbordador o mediante un cohete de tres etapas, según se muestran en la figs. 2.30 y 2.31:

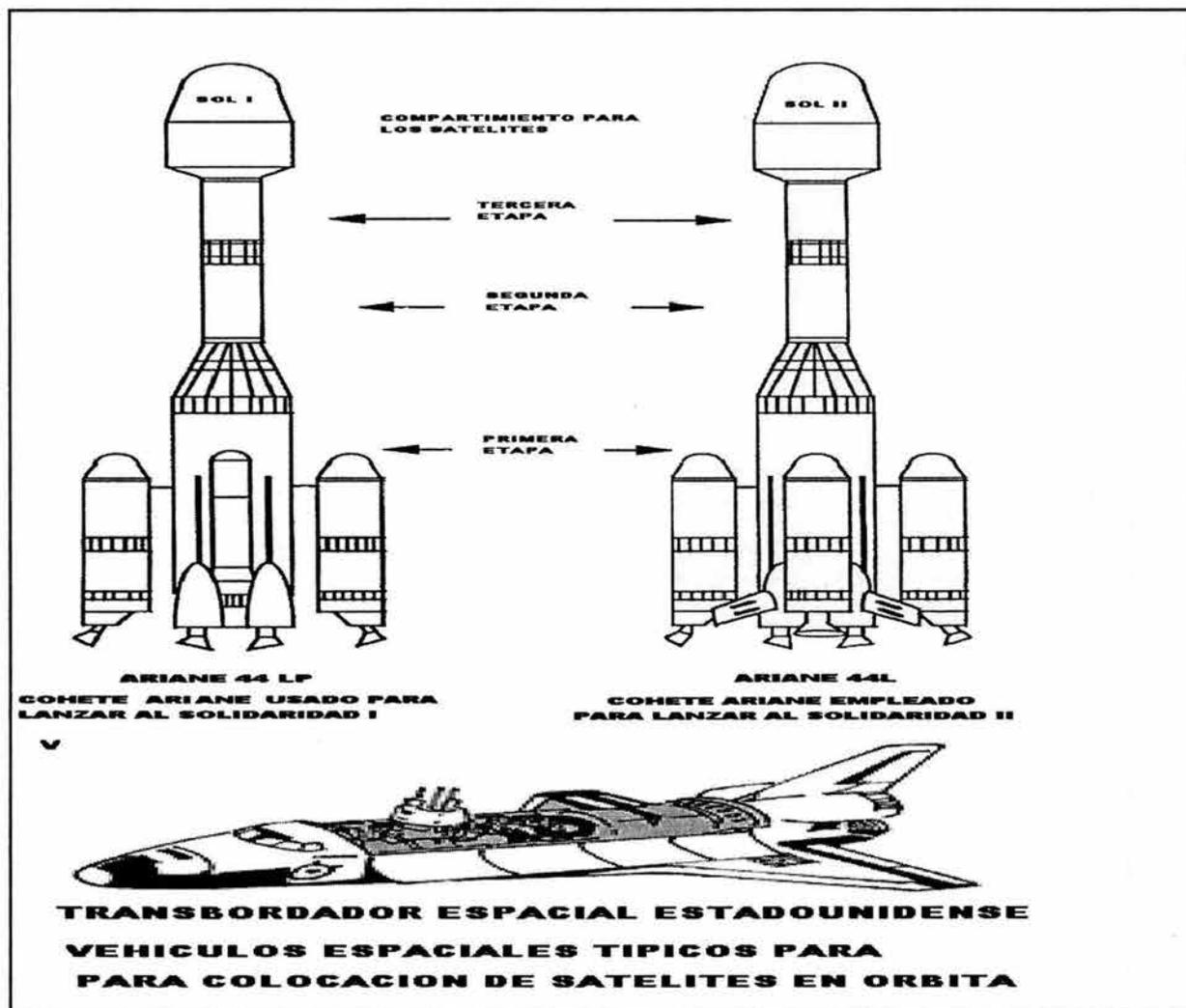


FIGURA 2.30 VEHÍCULOS CLÁSICOS PARA COLOCAR EN ÓRBITA SATÉLITES

Principales Vehículos de lanzamiento					
1	Soyuz	2	Proton	3	Energiya/Bur n
4	Ariane4	5	Ariane5	6	Long March
7	Delta - II	8	Atlas - II	9	Titan - III

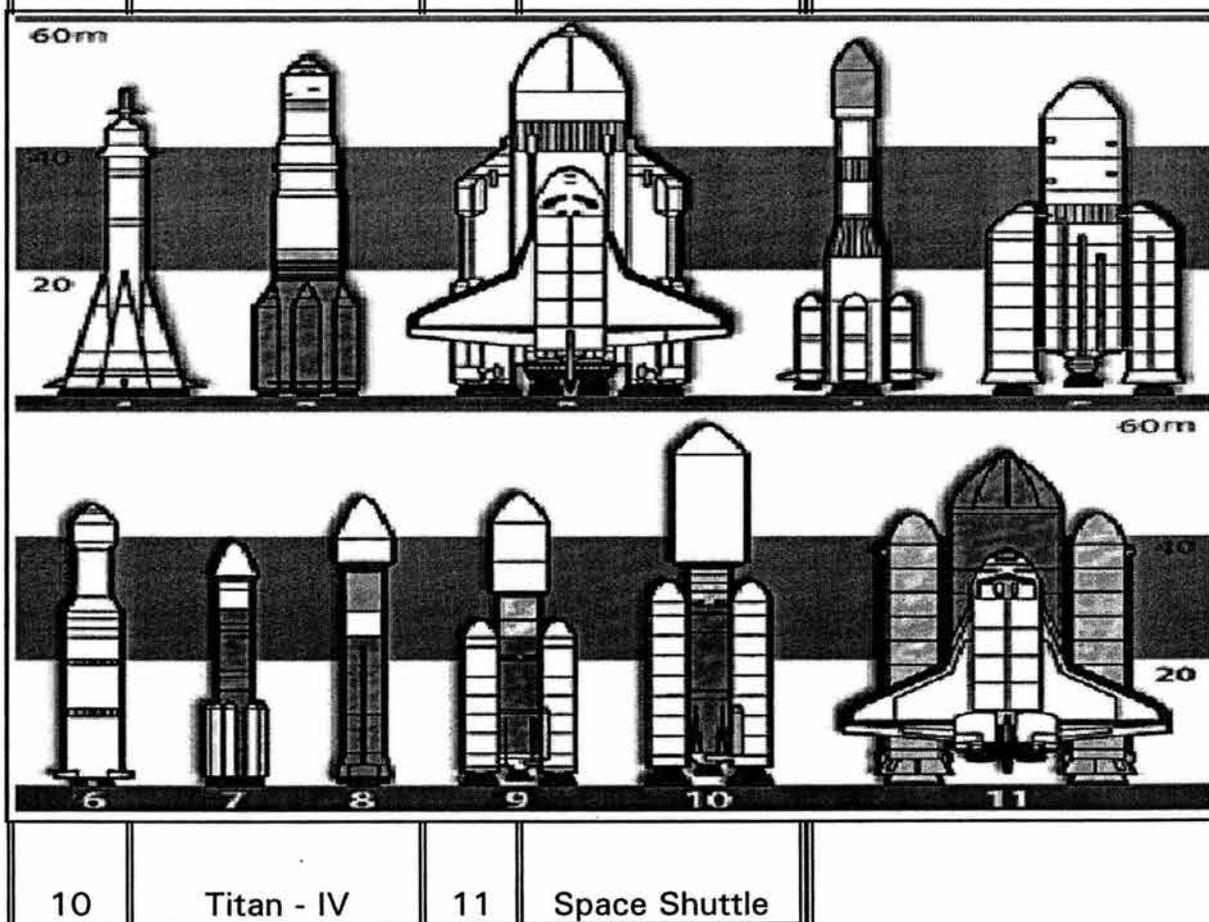


FIGURA 2.31 PRINCIPALES VEHICULOS PARA COLOCACIÓN EN ÓRBITA

En el caso del transbordador, la NASA coloca al satélite en una órbita circular baja de aproximadamente 300 km., de altura, el satélite enciende entonces un motor denominado de perigeo con lo cual la órbita se vuelve una elipse con un punto alejado o de apogeo a 22,238 millas y el punto cercano o perigeo no menor a 100 millas.

La fase de inyección en órbita geoestacionaria o circular se realiza a partir del apogeo mediante un motor de impulso del satélite(AKM) que lo coloca en su posición orbital asignada. (Con el accidente del Challenger, la NASA no utiliza más para este fin el transbordador).

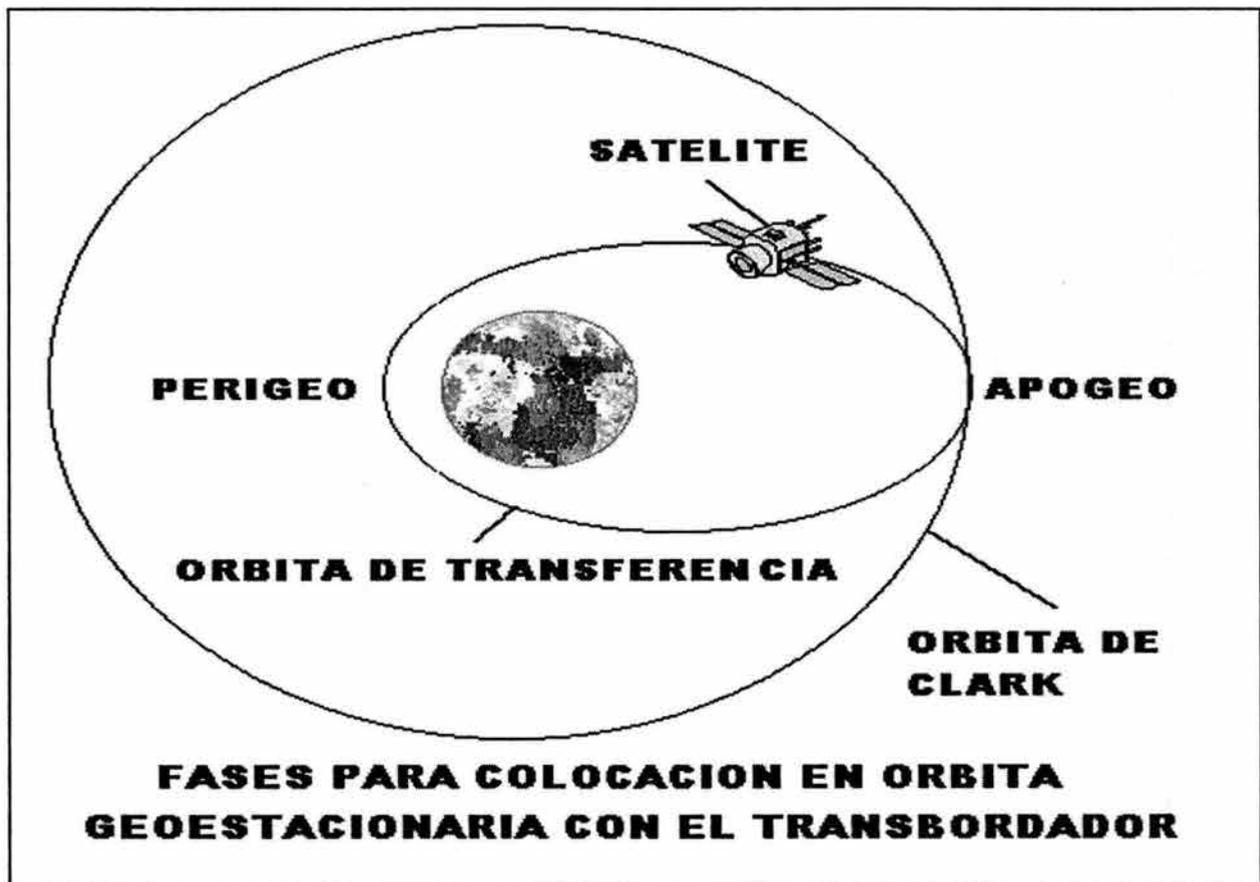


FIGURA 2.32 COLOCACIÓN EN ÓRBITA GEOESTACIONARIA

La alternativa más usada y segura para colocar satélites en órbita es mediante cohetes, a continuación se muestra en la fig 2.33, las etapas requeridas para el posicionamiento orbital utilizando el cohete ariane:

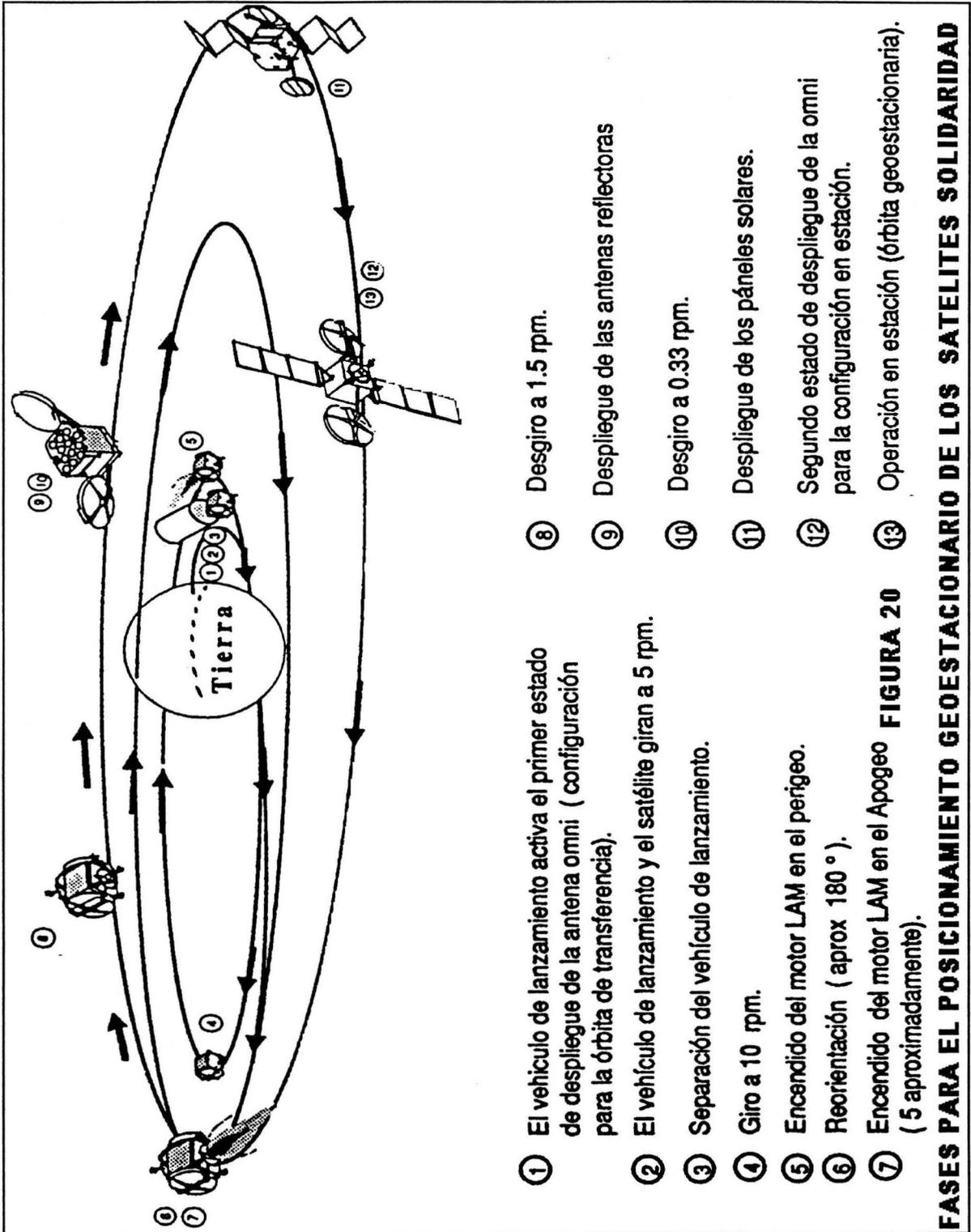


Figura 2.33 posicionamiento de un satélite geoestacionario

La forma más económica de colocar un satélite en órbita geoestacionaria es, a partir de encendidos sucesivos de su motor de apogeo (combustible líquido), precisamente en cada uno de los apogeos de las órbitas elípticas, lo cual hace que la órbita tienda a hacerse circular, es decir modificando su excentricidad.

2.4 TENDENCIAS AL FUTURO

La tendencia general es hacia sistemas satelitales de banda ancha, pues día con día se hacen esfuerzos por manejar enlaces multimedia, es decir, manejar voz, datos y video en tiempo real. Para lograr esta meta es necesario migrar hacia bandas Ka y V.

El enemigo de las comunicaciones multimedia es el tiempo de retardo entre señales full duplex, para evitarlo hay que utilizar:

- Constelaciones satelitales LEO en banda Ka,
- Grupos de dirigibles alimentados con energía solar, equipados con repetidores de microondas en banda V y colocados en la estratósfera para cubrir las principales ciudades con haces altamente directivos y posible transmisión hacia satélites en órbita.

Actualmente el proyecto satelital más ambicioso es el denominado Teledesic, que pretende, mediante 30 satélites en órbita no geoestacionaria (800 km. Originalmente), establecer el Internet en el espacio con comunicaciones digitales en banda Ka. Es un proyecto conjunto de Bill Gates de Microsoft, Cray Mccauhgt de la telefonía celular norteamericana y la Boeing con un costo cercano a los 9000 millones de dólares que se espera estén en operación para el 2005, con velocidades desde 128 kbps hasta 100 Mbps en subida y de hasta 720 Mbps en bajada.

2.5 SISTEMAS LEOS/MEOS CONTRA GEOS

VENTAJAS LEOS

- Colocación en órbita menos costosa
- menor retardo para las señales
- requiere transpondedores con menos potencia
- menos pérdidas con la distancia
- cobertura global
- menor tamaño y costo por satélite
- es factible su recuperación y reparación
- antenas en tierra pequeñas

DESVENTAJAS LEOS

- vida por satélite de 5 años en promedio
- menor cobertura a menor altura
- aparece el efecto dopler que se acentúa en los polos
- requiere antenas con ángulos específicos para recepción o de sistemas de rastreo
- mayor número de satélites para cobertura global
- el efecto dopler afecta a los enlaces digitales que requieren de demodulación altamente coherente
- requiere de enlaces intersatelitales y proceso a bordo de las señales y un sistema de conmutación complejo
- requiere de handoff entre satélites

2.6 SISTEMAS LEOS/MEOS CONTRA GEOS

DESVENTAJAS GEOS

- Colocación en órbita costosa
- mayor retardo para las señales
- Transpondedores con mucha potencia
- mayores pérdidas con la distancia
- mayor tamaño y costo por satélite
- no es factible su recuperación y reparación

VENTAJAS GEOS

- vida por satélite de 15 años en promedio
- cobertura configurable a países enteros o áreas
- requiere antenas en tierra grandes
- menor número de satélites para cobertura global
- requiere de handoff entre satélites

2.7 CENTROS DE LANZAMIENTO DE SATÉLITES

La investigación espacial se realiza en diversos lugares del mundo, en menor proporción existen centros de lanzamiento de satélites, sin embargo, los lugares con mayor actividad de ambos son:

- Estados Unidos
- Rusia
- Francia y la unión europea
- Japón
- China

El primero de ellos cuenta con Centros e Institutos de reconocido prestigio en la investigación espacial, además de sus Departamentos de Defensa, Información, Naval, etc., que cuentan con laboratorios diversos, sin faltar el apoyo de varias Universidades. También está presente la NASA (National Aeronautics and Space Administration), o agencia gubernamental con sus diversos centros: el "Jet Propulsion Laboratory", "Kennedy Space Center", "Los Alamos National Laboratory", "Goddard Space Center", entre otros. Además es de comentarse que Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization, es un organismo internacional que agrupa a más de 110 países), ubica sus oficinas en Washington D.C. La regulación espacial está a cargo de la FCC.

La empresa privada Comsat representa a Estados Unidos tanto en Intelsat como en Inmarsat, esta última también es un organismo internacional de ayuda a la navegación marítima y de transportación.

La unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas colocó en órbita al primer satélite artificial y ha sido sin lugar a dudas la que más satélites ha puesto en órbita. Actualmente Rusia controla el 90% de esa industria espacial y sus cosmódromos más importantes son manejados por el CIS/USRR.

En Europa se encuentran diversos centros de investigación, destacando la ESA (European Space Agency), el "European Space Research Institute", y el "European Space Research and Technology Centre".

Recientemente han surgido como potencias espaciales Japón y

China y, en el caso de la primera mencionada en este párrafo, cuenta inclusive con un simulador del transbordador espacial estadounidense.

La tendencia global es hacia la investigación y colaboración conjunta por parte de diversos países.

La importancia de un centro de lanzamiento de satélites depende de su cercanía con el ecuador, pues, de esta manera la colocación en órbita se realiza con menos recursos (que se interpreta como menos costo), de ahí la importancia del centro de lanzamiento Kourou, ubicado a 5 grados norte del plano ecuatorial y de la reciente plataforma móvil internacional de lanzamiento marítimo denominada "Sea Launch" que lanza satélites mediante cohetes ucranianos/rusos en alta mar, lejos de ciudades que podrían ponerse en riesgo, al ubicarse en 0 grados de latitud. Una vez realizado el lanzamiento, la plataforma es nuevamente remolcada a su base en los Angeles California. Esta sociedad comenzó a operar en septiembre de 1999.

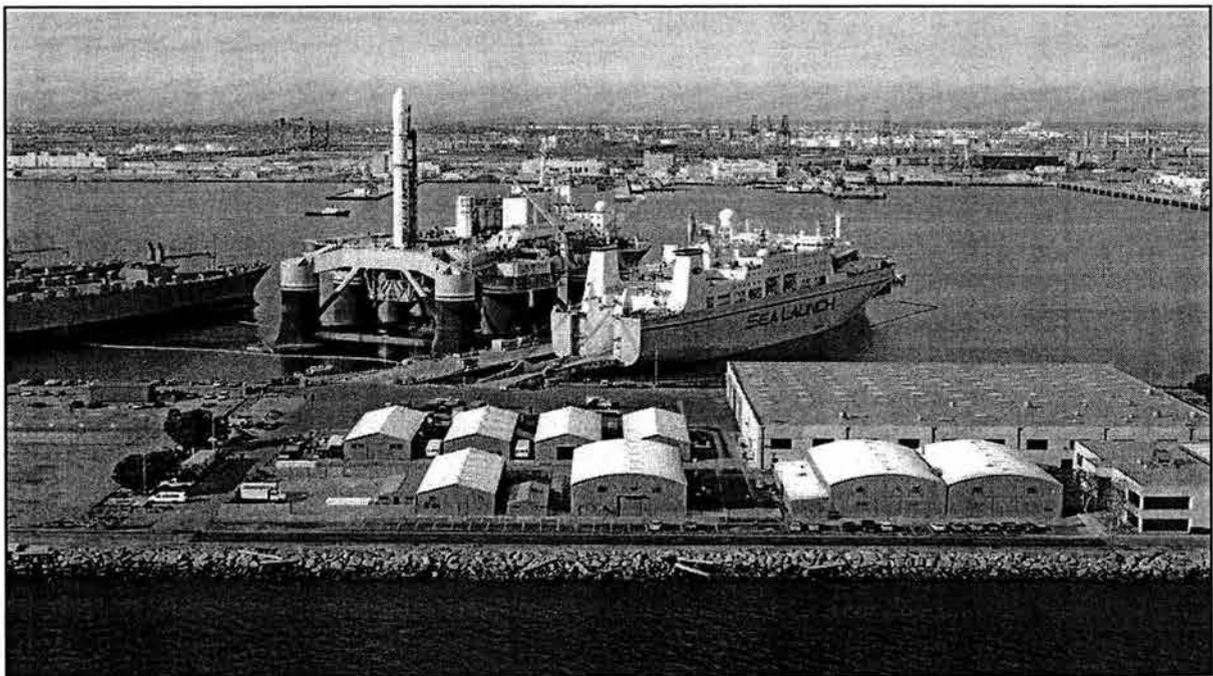


FIGURA 2.34 COMPLEJO SEA LAUNCH

A continuación se menciona brevemente las características de los principales centros de lanzamiento a escala global:

2.7.1 CENTROS DE LANZAMIENTO DE SATÉLITES EN EL CONTINENTE AMERICANO

	Cabo Cañaveral 28.5°17' N, 81° W	Sus lanzamientos están limitados a órbitas con inclinación máxima de 57° N. A la fecha ha realizado más de 550 lanzamientos.
DE ESTADOS UNIDOS	Base Edwards 35° N, 118° W	De 1990 a 1994 realizó 5 lanzamientos
	Vandenberg Space Shuttle Launch Complex 34.4° N, 120.35° W	Se emplea para misiones polares. A la fecha ha realizado más de 550 lanzamientos.
	Wallops Island 37.8° N, 75.5° W	Desde feb. de 1961 se empleó para vehículos Scout y actualmente se usa como base de cohetes. Ha realizado más de 20 lanzamientos.
DE FRANCIA	Centre Spatial Guyanais (5°14' N, 52°46' W)	Desde Kouru, coloca en órbitas ecuatoriales, polares/sincrono solares, con inclinaciones de hasta 100.5°. A la fecha ha realizado más de 100 lanzamientos.
	Alcantara Launch Centre (2°17' S, 44°23' W)	Inició operaciones en febrero de 1990 con lanzamiento de cohetes meteorológicos y otros vehículos científicos.
DE BRASIL	Barreira do Inferno (5°55' S, 35°10' W)	Hasta 1980 funcionó para lanzamientos y actualmente para servicios de telemetría, radar y procesamiento en tiempo real de los lanzamientos de Ariane desde la Guyana francesa.

2.7.2 CENTROS DE LANZAMIENTO DE SATÉLITES EN AUSTRALIA, INDIA Y SUDAFRICA

En Australia/UK	Woomera 31.1° S, 136.8° E	De 1957 a 1985 ha realizado un par de lanzamientos.
En India	SHAR, Sriharikota 13.9° N, 80.4° E	Ha realizado alrededor de tres lanzamientos.
En Sudafrica	OTB 34.58°S, 20.32°E	No ha realizado lanzamientos.

2.7.3 CENTROS DE LANZAMIENTO DE SATÉLITES EN EUROPA, RUSIA, JAPÓN Y CHINA

DE EUROPA	Hammaguir (Francia) 31°0' N, 8° W	De 1957 a 1985 ha realizado 4 lanzamientos.
	San Marco Plattform (Italia) 2.9° S, 40.3° E	De 1957 a 1988 realizó 9 lanzamientos.
	Torrejon (España) 40.48° N, 3.457° W	No ha realizado lanzamientos.
	Palmachin/Yavne (Israel) 31.5° N, 34.5° E	Ha realizado alrededor de tres lanzamientos.
DE RUSIA	Tyuratam (Baikonur) 45.6° N, 63.4° E	Ha realizado más de 1000 lanzamientos diversos.
	Kapustin Yar 48.4° N, 45.8° E	Ha realizado alrededor de 100 lanzamientos.
	Plesetsk (62.8°0' N, 128.3° E)	Ha realizado más de 1500 lanzamientos.
	Svobodny 51.37° N, 128.3° E	Es el más reciente cosmódromo construido
DE JAPON	Kagoshima (31.2° N, 131.1° E)	Ha realizado alrededor de 25 lanzamientos.
	Tanegashima 30.4° N, 131° E	Ha realizado alrededor de 30 lanzamientos.
DE CHINA	Jiukuan 40.6° N, 99.9° E	Ha realizado alrededor de 25 lanzamientos.
	Taiyuan/Wuzhai 30.4° N, 131° E	Ha realizado un par de lanzamientos.
	Xichang 30.4° N, 131° E	Ha realizado alrededor de 20 lanzamientos.

2.8 TÉCNICAS DE MULTIPLEXAJE, MODULACIÓN Y ACCESO AL SATÉLITE GEOESTACIONARIO PARA LA DIFUSIÓN DE LA INFORMACIÓN

Las estaciones terrenas de las redes satelitales emplean al satélite como punto nodal o central para intercambiar información entre ellas. Para diseñar una red vía satélite, se requiere de un estudio que determine si se requiere multiplexar señales en banda base, que tipo de modulación se empleará y la selección de alguna de las técnicas específicas de acceso múltiple al satélite.

Cada estación está asociada a uno de los diversos canales de un satélite, mismos que se agrupan en los transpondedores (o repetidores de microondas a bordo del satélite). Los transpondedores operan en paralelo y cubren mediante subbandas el ancho de banda total asignado al satélite (típicamente los anchos de banda de los transpondedores son 36, 54 y 72 MHz). Cada transpondedor amplifica las portadoras cuyo espectro frecuencial cae dentro de la subbanda que le ha sido asignada.

El ancho de banda de un transpondedor fue establecido con base en la tecnología desarrollada para las redes terrestres de microondas y adaptado para transmitir 1 o 2 señales de televisión moduladas en frecuencia (FM) que requerían 36 MHz. De esa forma los primeros satélites para telecomunicaciones recibían señales multiplexadas en frecuencia, viajando en portadoras moduladas en frecuencia y con acceso múltiple al satélite también en frecuencia, dichos sistemas se conocen como FDM/FM/FDMA.

2.8.1 MULTIPLEXAJE, MODULACIÓN Y ACCESO AL SATÉLITE

Para aprovechar de una manera más eficiente la capacidad de los transpondedores, se han desarrollado diversas técnicas de multiplexaje de las señales en banda base, modulación de la portadora que sube y, por último técnicas para acceso a los transpondedores del satélite.

2.8.1.1 MULTIPLEXAJE

El multiplexaje permite reunir sin revolver, varias señales en banda base (separándolas en frecuencia, tiempo o código), para conformar una señal compuesta que modulará a la portadora que se envía al satélite.

Los primeros sistemas analógicos vía satélite empleaban multiplexaje en frecuencia seguido de modulación analógica y acceso múltiple al satélite por división de frecuencia; los sistemas digitales, preferentemente utilizan el multiplexaje en tiempo con modulación digital y acceso múltiple por división de tiempo. La opción de multiplexaje por división de código prácticamente no se emplea.

Todo estudio para instalación de un enlace o red via satélite debe compararse contra todas las opciones posibles de redes, en caso de elegirse el enlace satelital, se debe considerar:

- Los sitios que manejan poco tráfico. Éstos por lo general están aislados y no se puede o no conviene multiplexar sus señales.
- Los lugares que presentan gran volumen de tráfico. Para ellos normalmente la mejor opción es multiplexar sus señales.

La señal multiplexada (compuesta) primeramente es trasladada a una frecuencia intermedia de 70 MHz y, posteriormente combinada con la portadora que se envía al satélite por el HPA (amplificador de alta potencia).

El esquema general de las señales multiplexadas y moduladas de los primeros sistemas analógicos se muestra en la figura 2.34.

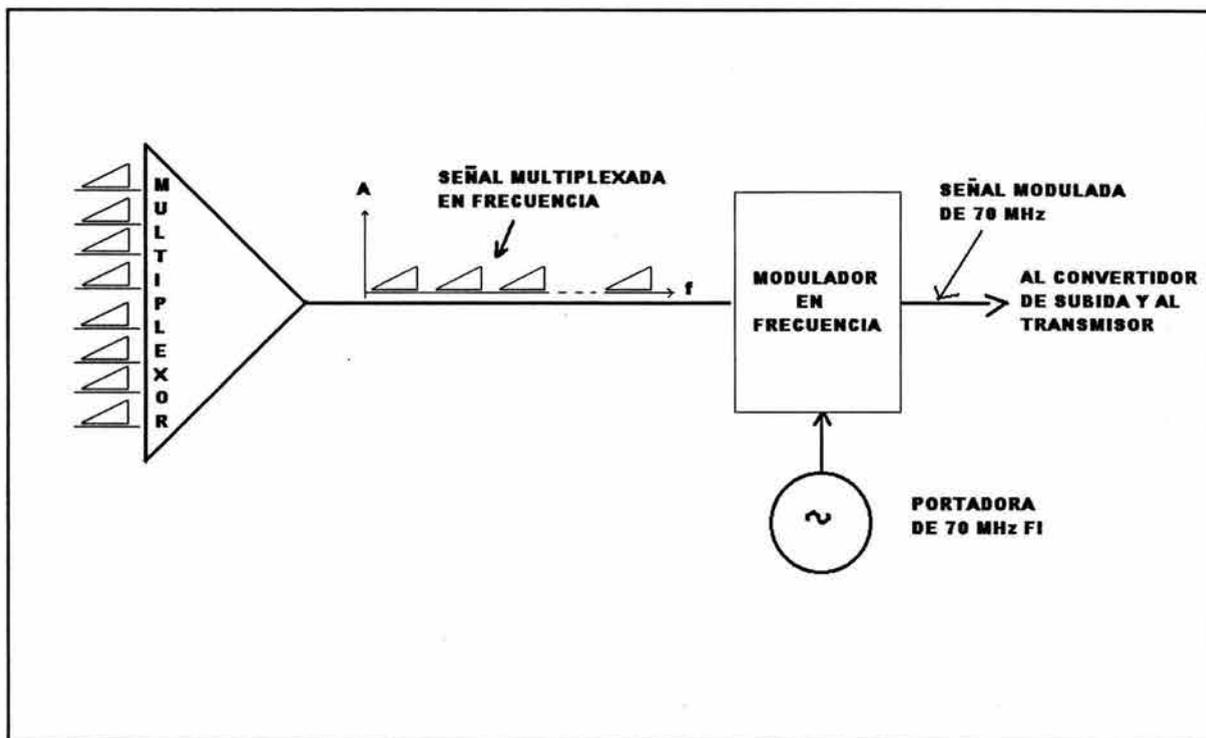


FIGURA 2.34 SEÑALES MULTIPLEXADAS Y MODULADAS QUE SE ENVIAN AL SATÉLITE

2.8.1.2 MODULACIÓN

En el caso de las comunicaciones via satélite, la modulación de la portadora preferentemente se ha realizado mediante:

- Modulación en frecuencia para señales analógicas y
- Modulación BPSK y QPSK para señales digitales.

El tipo de multiplexaje y modulación se seleccionan dependiendo del tipo de señal, volúmen de tráfico y tecnología disponible para las estaciones que se enlazan a través de los transpondedores.

2.8.1.3 TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE AL SATÉLITE

El objetivo de las diversas técnicas de acceso al satélite es evitar la interferencia y congestión entre portadoras que solicitan acceso a los transpondedores del satélite; con ellas se establecen condiciones o reglas específicas para la recepción de señales de las estaciones. Las técnicas de acceso múltiple básicas son:

- (FDMA o Frequency Division Multiple Access)
- (TDMA o Time Division Multiple Access)
- (CDMA o Code Division Multiple Access)

Además, los transpondedores también pueden compartirse por acceso preasignado o fijo, técnicas de acceso aleatorio y por demanda.

En el acceso fijo o preasignado, se tiene un canal dedicado, exclusivo de la estación terrena y se denomina SCPC (Single Chanel per Carrier o canal único por portadora). Este esquema se emplea para tráfico de baja velocidad tanto digital como analógico, es decir, para redes pequeñas, con cantidades más o menos constantes de tráfico.

Una opción de TDMA es el acceso por demanda o DAMA (Demand Assignment Multiple Access), la estación reserva implícita o explícitamente la capacidad del canal mediante ranuras de tiempo específicas para su uso.

Las redes grandes, con tráfico altamente variable, tanto en volúmen como en origen y destino requieren de sistemas de control del acceso por demanda costosos que, además reducen en general la capacidad del transpondedor. Una variante controla el flujo durante las congestiones (se adapta el tráfico) y es conocida como AA/TDMA Adaptive assignment time division multiple access.

Si el tráfico emplea TDMA sin control de acceso por demanda, las estaciones pueden transmitir bajo ciertas ranuras de tiempo aleatoriamente y puede ocurrir interferencia entre algunas de ellas y se tendrá que repetir su transmisión

Para tráfico de ráfagas cortas y aleatorias en el tiempo, la mejor técnica es por acceso aleatorio, es decir sin control. Obviamente en este caso puede ocurrir colisiones e interferencias con las ráfagas y algunas de las transmisiones se perderán y tendrán que ser repetidas, sin embargo el costo en esta opción sigue siendo menor que el de un esquema de acceso por demanda. Esta opción se conoce como de difusión de paquetes y en honor al primer lugar donde se empleo, la Universidad de Hawaii, se le conoce como ALOHA.

2.8.1.3.1 PRINCIPALES PROTOCOLOS DE ACCESO ALEATORIO

Generalmente el desempeño de los diversos protocolos de acceso aleatorio al satélite se ha medido a través del parámetro conocido como throughput que se define como el cociente del tráfico recibido en el destino entre la máxima capacidad de transmisión del canal (ver fig. 2.35).

Los primeros y más conocidos protocolos de acceso aleatorio se desarrollan en la Universidad de Hawaii:

- El primero de ellos, conocido como protocolo "Aloha" o de transmisión de paquetes totalmente aleatorio, permite que cualquier usuario de la red pueda transmitir paquetes de datos digitales de forma aleatoria en el tiempo al igual que los demás usuarios de la red y por consiguiente, los paquetes pueden colisionar total o parcialmente al intentar acceder al satélite. La estación que transmite, siempre está en espera de que le confirme la estación receptora mediante un mensaje ACK, si éste no llega, retransmite. El throughput sólo alcanza el 18.3%.
- La siguiente mejora es el protocolo "Aloha ranurado" que transmite paquetes sólo al inicio de intervalos previamente establecidos. con este cambio el throughput mejora al 36.6%.

Un sistema ALOHA considera que los paquetes se generan dentro de un proceso Poissoniano, en el que todos los paquetes son de tamaño T_s y la probabilidad de que un paquete se origine en el intervalo ΔT es proporcional a ΔT , pues se supone se transmite a una tasa

$\lambda \frac{\text{paquetes}}{\text{seg.}}$ y que los paquetes que colisionan se pierden.

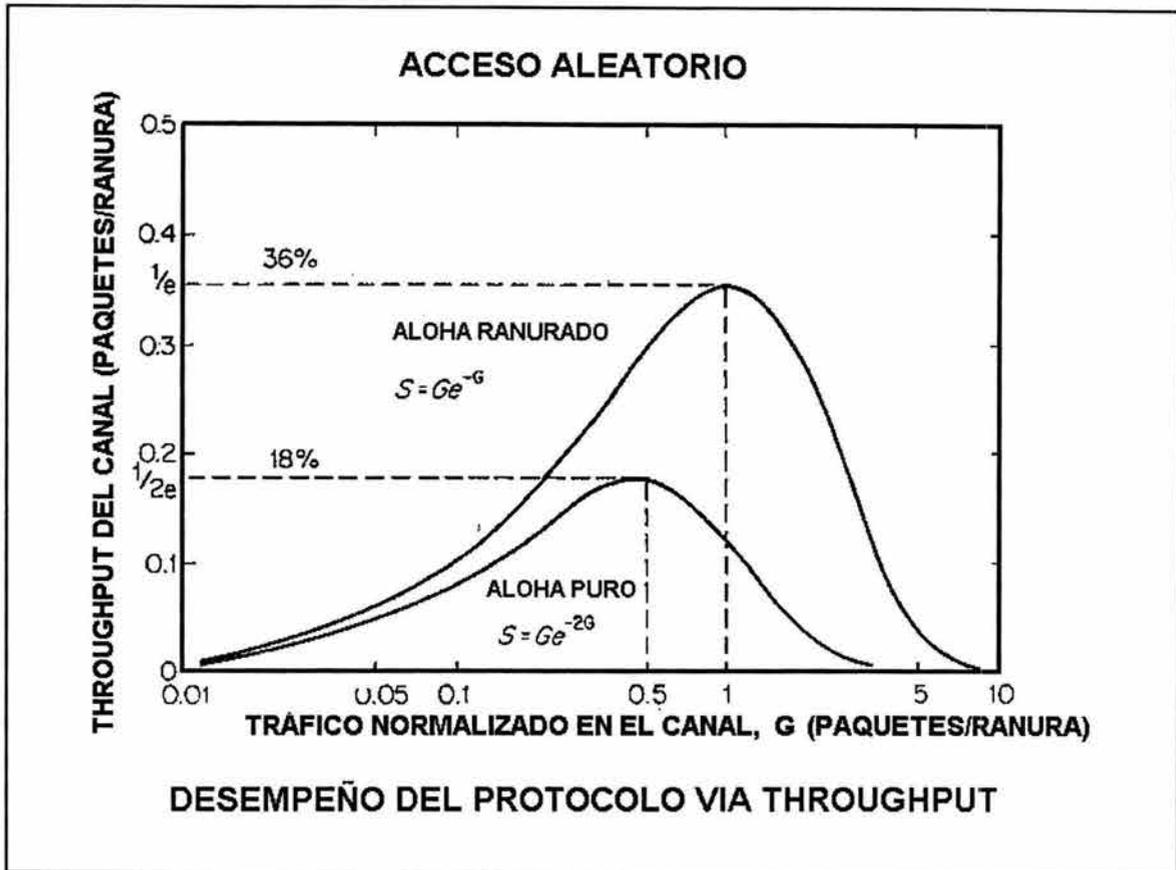


FIGURA 2.35 DESEMPEÑO DE LOS PRINCIPALES PROTOCOLOS DE ACCESO ALEATORIO.

ACCESO ALEATORIO ALOHA

Como ya se comentó, este protocolo permite la colisión total o parcial de los paquetes que las diversas estaciones transmiten en un momento dado (ver figura 2.36):



FIGURA 2.36 COLISIÓN DE PAQUETES EN EL PROTOCOLO ALOHA

ANÁLISIS TEÓRICO DEL PROTOCOLO ALOHA

sea:

λ = *mensajes o paquetes por segundo de todos los usuarios*

$\dot{\lambda}$ = *Tráfico total (mensajes transmitidos + retransmitidos)*

por consiguiente: $\dot{\lambda} > \lambda$ además, dado que:

k = *longitud de cada paquete*

R = *Tasa del canal*

La cantidad de tráfico que los usuarios requieren entregar está dado por:

$$\lambda \times k$$

Definiendo:

$S = \lambda \bullet k$ = *throughput del canal*

$G = \dot{\lambda} \bullet k$ = *tráfico del canal*

Normalizando con respecto a la tasa del canal

$$S = \frac{\lambda k}{R} = \textit{throughput del canal normalizado}$$

g = *Tráfico del canal normalizado*

La duración de cada paquete sobre el canal es:

$$\tau = \frac{k}{R} \text{ [segundos por paquete]}$$

Sustituyendo τ en las expresiones anteriores, encontramos:

$$S = \lambda \cdot \tau$$

$$g = \lambda' \cdot \tau$$

La probabilidad de un arribo de k nuevos paquetes sobre un intervalo de tiempo es:

$$P(k) = \frac{(\lambda \tau)^k e^{-\lambda \tau}}{k!}$$

donde λ es la cantidad de arribos de paquetes

La probabilidad de que ningun paquete arribe en el intervalo 2τ está dado por:

$$P_s = P(k=0) = \frac{(\lambda' 2\tau)^0 e^{-\lambda' 2\tau}}{0!} = e^{-2\lambda' \tau}$$

La expresión anterior nos da la probabilidad de transmisión exitosa de un paquete de un usuario en particular.

Pero P_s también puede definirse como:

$$P_s = \frac{\text{throughput del canal}}{\text{tráfico del canal}} = \frac{\lambda}{\lambda'}$$

Igualando las dos espresiones de P_s :

$$\left(\frac{\lambda}{\lambda'}\right) = e^{-2\lambda' \tau} \text{ por consiguiente: } \lambda = \lambda' e^{-2\lambda' \tau}$$

al multiplicar ambos lados de la ecuación por τ obtenemos:

$$\lambda T = \dot{\lambda} T e^{-2\dot{\lambda} T}$$

Sustituyendo las expresiones del throughput y tráfico del canal en la expresión anterior resulta:

$$S = g e^{-2g}$$

dicha expresión representa el throughput útil que el canal aloha entrega y es también el tráfico total que fluye en el canal.

El punto de throughput máximo del canal ocurre cuando $g = 0.5$ y tiene un valor de $(1/(2 e)) = 0.184$,. Este punto es llamado el "Throughput máximo del canal Aloha" e indica que el canal se emplea el 18.4% del tiempo para enviar paquetes únicos y que el paquete promedio debe repetirse 2.7 veces antes de que sea recibido sin interferencia.

Lo anterior se comprueba dado que la utilización normalizada del canal para paquetes sin repetición está dada por:

$$G = \lambda T$$

donde:

$$\lambda = \dot{\lambda} e^{-2\dot{\lambda} T}$$

mientras que el número de veces que un paquete tiene que retransmitirse para no tener colisiones es:

$$N = e^{2\dot{\lambda} T}$$

donde:

$$G = \frac{1}{2N} \log_e(N)$$

es decir, se confirma que un paquete tiene que enviarse 2.7 veces para que sea recibido sin interferencia pues al estimar que el canal se usa 18.4% del tiempo para el envío de paquetes sin repetición, bajo condiciones de máximo desempeño del canal.

Se recomienda que las estaciones bajo este esquema posean un generador de números aleatorios que determine el momento de transmisión, de tal manera que realmente se transmita de forma aleatoria y se disminuya el número de colisiones. El Aloha ranurado es una mejora de este procedimiento pues permite la transmisión sólo al inicio de intervalos preasignados de tiempo, obligando a colisiones totales y no en los extremos de los paquetes saliente/entrante y el canal se usa de mejor manera alcanzando el 36.8% de uso.

ACCESO MULTIPLE CON PROCESAMIENTO A BORDO

Si se incluye procesamiento a bordo del satélite, es posible tener acceso mediante FDMA, almacenar y reprocesar la información de la portadora multiplexada y, retransmitir mediante TDMA. En el reproceso se gana un dB pues se elimina el ruido de subida y, en la bajada se ganan otros 5 dB dado que se usa una sola portadora y se elimina la necesidad de backoff de salida.

2.8.1.3.2 ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA (FDMA)

Es la primera de las técnicas de acceso desarrollada. En ella el ancho de un transpondedor se subdivide en subbandas que son asignadas a las portadoras de las estaciones (usuarios), quienes transmiten simultáneamente mediante esas distintas frecuencias denominadas "canales", sin que se superpongan los espectros pues en el satélite, éstos también están separados mediante subbandas de guarda. (Cada portadora tiene su posición en el dominio de la frecuencia, ver figura 2.37). A continuación el satélite retransmite y los receptores discriminan portadoras mediante filtrado que selecciona el canal y ráfaga que les corresponde. Esto obliga a hacer ineficiente el uso de recursos (tiempo de ocupación y potencia). Considérese por ejemplo un satélite con más de 30 transpondedores con filtros altamente selectivos y fijos que sólo se emplean por períodos cortos, con tráfico bajo, es decir sólo se emplean un porcentaje bajo de la capacidad total del satélite pues muchos canales permanecen inactivos varias horas al día.

Esta es la técnica más antigua y, la más fácil de emplear, sin embargo se presentan problemas de intermodulación si el transponder trabaja cerca del punto de saturación; también puede

presentarse la interferencia de canales adyacentes. Además hace uso ineficiente de la potencia que maneja el transpondedor.

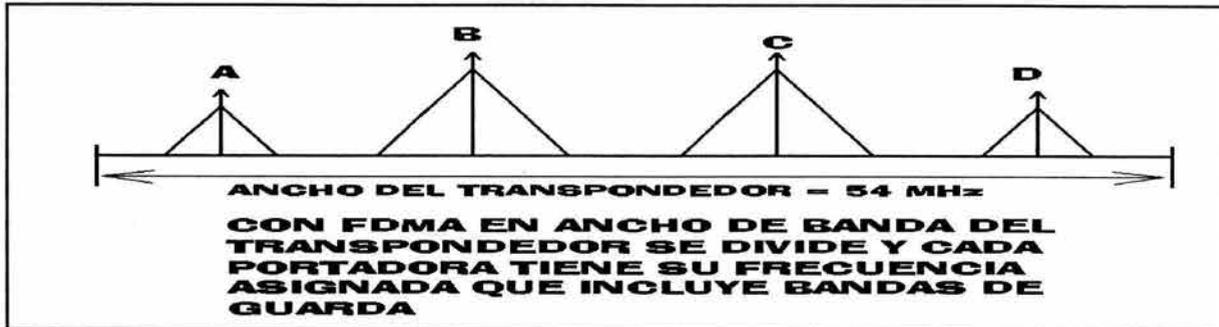


FIG. 2.37 PORTADORAS EN UN TRANSPONDEDOR

El formato de la distribución de la portadora está en función de:

- La distorsión de la señal.
- La interferencia de canales adyacentes.
- La intermodulación de los amplificadores.

El acceso múltiple por división de frecuencia tiene dos variantes importantes: la opción CSSB y la opción SCPC.

2.8.1.3.3 ACCESO MÚLTIPLE POR PORTADORA EN BANDA LATERAL ÚNICA COMPANDIDA (CSSB SYSTEMS)

Esta es una opción para señales analógicas; los canales de voz son apilados en frecuencia mediante una modulación en banda lateral única con portadora suprimida y a continuación sumadas para conformar una señal telefónica multiplexada. Dicha señal es directamente desplazada hasta la FI mediante otra señal en banda lateral única. Con bandas de guarda cada señal ocupa 4 kHz y, en los receptores, cada una de esas señales puede ser extraída, mediante filtrado, sin la costosa demultiplexación.

Esta opción emplea mejor la potencia y el ancho de banda del transmisor que FDM/FM e incluso que la modulación digital, sin embargo la tecnología digital es mucho mejor en costo y facilidades de recuperación y corrección de la información.

2.8.1.3.4 ACCESO MULTIPLE POR PORTADORA SCPC (SINGLE CHANNEL PER CARRIER)

Para los usuarios analógicos o digitales con poco tráfico o tráfico esporádico, de tipo móvil inclusive, una alternativa importante es no multiplexar las señales en banda base y, en lugar de usar el esquema FDM/FM/FDMA, asignar una estación terrena por portadora que se transmite al satélite, modulándolas por separado y recibíéndolas en el transpondedor de tal manera que se minimicen los productos de intermodulación, tal vez asignando espaciamientos no uniformes; ésto implica una reducción o pérdida de capacidad y reducción de potencias de transmisión o backoffs mayores que en FDM/FM/FDMA y con portadora presente sólo cuando el enlace está activo, es decir, economizando la potencia del transpondedor, pero con posibilidad de mayor número de accesos, es decir mayor número de usuarios sin la costosa multiplexación/demultiplexación. Además la voz en SCPC tiene una menor desviación de frecuencia "rms" que cuando se multiplexa las señales de banda base en frecuencia (FDM) y, por consiguiente, produce también una mejor relación S/N por canal.

Para mejorar aún más este tipo de acceso se utiliza compansión, mediante un amplificador no lineal en el transmisor que reduce el rango dinámico de la señal, amplificando los sonidos bajos que, por consiguiente brinda una mejor relación señal/ruido de hasta 20 dB, sin cambiar la relación de potencia señal/ruido. En el receptor un amplificador complementario no lineal o expansor, corrige la distorsión introducida por el compresor.

2.8.1.3.5 ACCESO MULTIPLE POR DIVISIÓN DE TIEMPO

Todas las estaciones pueden transmitir en la misma frecuencia pero en instantes diferentes, partiendo de un preámbulo de sincronización (la portadora ubica su posición en el dominio del tiempo).

En este caso el transpondedor ofrece todo su ancho de banda para cada una de las señales en el momento que les corresponde, y se hace un uso óptimo del mismo y de la potencia. Los receptores discriminan portadoras mediante las ranuras de tiempo asignadas (ver figura 2.38). Con este método se evitan interferencias.

Este método se prefiere con respecto a FDMA aunque exige una muy

buena sincronización, es decir equipamiento costoso; esta técnica, sin embargo, resulta problemática para algunos equipos digitales que no pueden procesar la señal si el retraso es mayor de 200 microsegundos. Además no es adecuada para usuarios intermitentes.

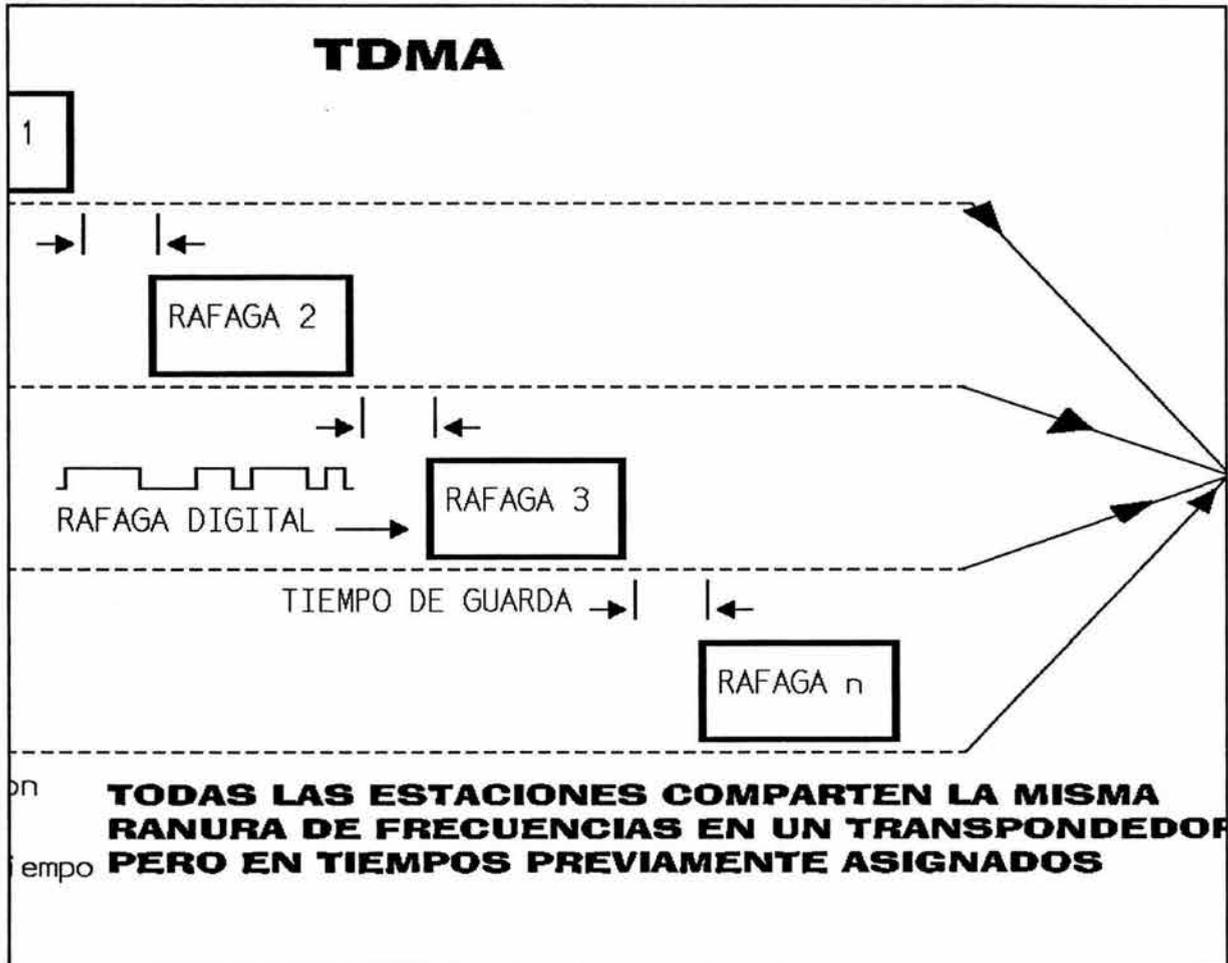


FIG. 2.38 TRANSMISIÓN POR DIVISIÓN DE TIEMPO

ADAPTIVE ASSIGNMENT OF TDMA

Esta es una variante de TDMA en la que se varía la longitud de los paquetes, con lo que se permite que los usuarios los servicios diversos como datos, voz y video pues se optimiza los recursos conservando la misma calidad de servicio en las redes bidireccionales. El desempeño se optimiza mediante parámetros controlables y con esta variante se mejora hasta 12 veces comparado con el desempeño del TDMA tradicional, pues tiene control de flujo

para evitar la inestabilidad durante las congestiones, además de facilitar la conectividad de última milla para el pequeño y mediano empresario.

En la modalidad de acceso aleatorio, presenta breve retraso cuando se maneja datos interactivos sensibles al tiempo.

Tiene un alto desempeño en la modalidad de batch, para la transmisión voluminosa de datos.

2.8.1.3.6 ACCESO MULTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO

En esta técnica se identifica un código que previamente se asignó a cada portadora, el cual es único y permite diferenciarlas aunque simultáneamente ocupen la misma banda de frecuencias (ver figura 2.39). Cada pareja que transmite/recibe debe estar sincronizada en fase.

Las familias de códigos ortogonales más empleados son "Walsh" y "Gold" y con ellas se aprovecha mejor la capacidad del canal.

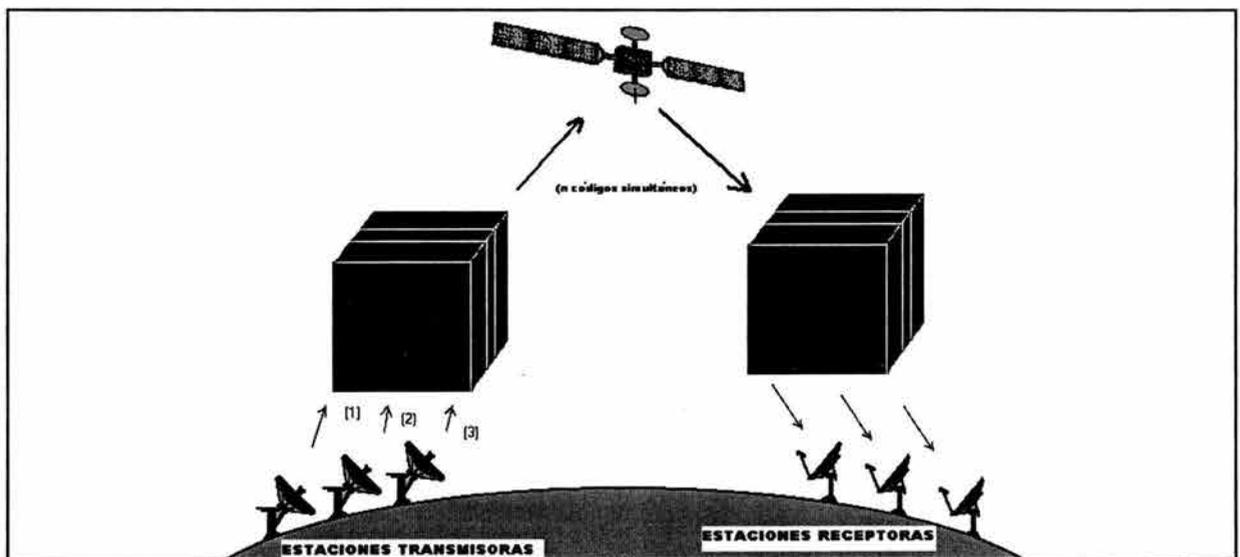


FIG. 2.39 TRANSMISIÓN POR DIVISIÓN DE CÓDIGO

Esta técnica de modulación dispersa en todo el ancho de banda del transponder el espectro de las señales en banda base. Todas las estaciones transmiten simultáneamente y cada receptor identifica la

señal de un transmisor en particular mediante el código o secuencia binaria específica que se mezcló con la información. Todos los códigos son ortogonales entre sí. Debido a que la identificación se realiza mediante secuencias de códigos pseudoaleatorios (Pseudo noise (PN) codes), esta técnica recibe su nombre de Code Division Multiple Access. La secuencia de cada código se emplea para "esparcir el espectro" de su portadora, por lo que también se le denomina SSMA (Spread Spectrum Multiple Access). En los sistemas comerciales, el ancho de banda del espectro esparcido ocupa de 20 a 254 veces el ancho de banda de la señal en banda base (sistemas comerciales), en los sistemas militares hasta 1000 veces el ancho de banda base.

El receptor recupera la información útil reduciendo el espectro de la portadora a su ancho de banda original, sin embargo al hacerlo, el espectro dispersado de otros usuarios aparece como ruido de baja intensidad espectral. Una señal recibida es demodulada coherentemente al multiplicarla por una réplica de la portadora; a continuación se filtran las altas frecuencias que se obtienen y sólo se conservan las componentes de baja frecuencia que se multiplican a su vez por el código local en fase con el código recibido. Por último la señal es integrada en el período de un bit con lo que se elimina el ruido y el mensaje se recupera a la salida del integrador.

El concepto de CDMA básico, los bits transmitidos a una tasa R_b , son esparcidos en frecuencia al multiplicarlos por una cadena binaria pseudoaleatoria (secuencia PN mostrada en la figura 2.40) con duración idéntica al período de los bits de la información (lo que implica que los bits de la cadena PN son de muy corta duración). El tiempo necesario para transmitir un símbolo de la cadena PN se conoce como CHIP.

Considerese una cadena de información cuyos bits son multiplicados de la siguiente manera:

Un +1 se multiplica por la cadena:

$$\{+1, +1, +1, -1, +1, -1, -1\}$$

y un -1 se multiplica por:

$\{-1, -1, -1, +1, -1, +1, +1\}$

La señal se modula con PSK y se transmite. En el receptor la señal PSK se demodula y se produce la cadena original al multiplicar lo recibido por la secuencia PN correspondiente, con lo que el espectro se reduce a su tamaño original. Este método emplea registros de corrimiento y sumas EXOR.

A continuación se muestra el proceso de multiplicación en la figura 2.40:

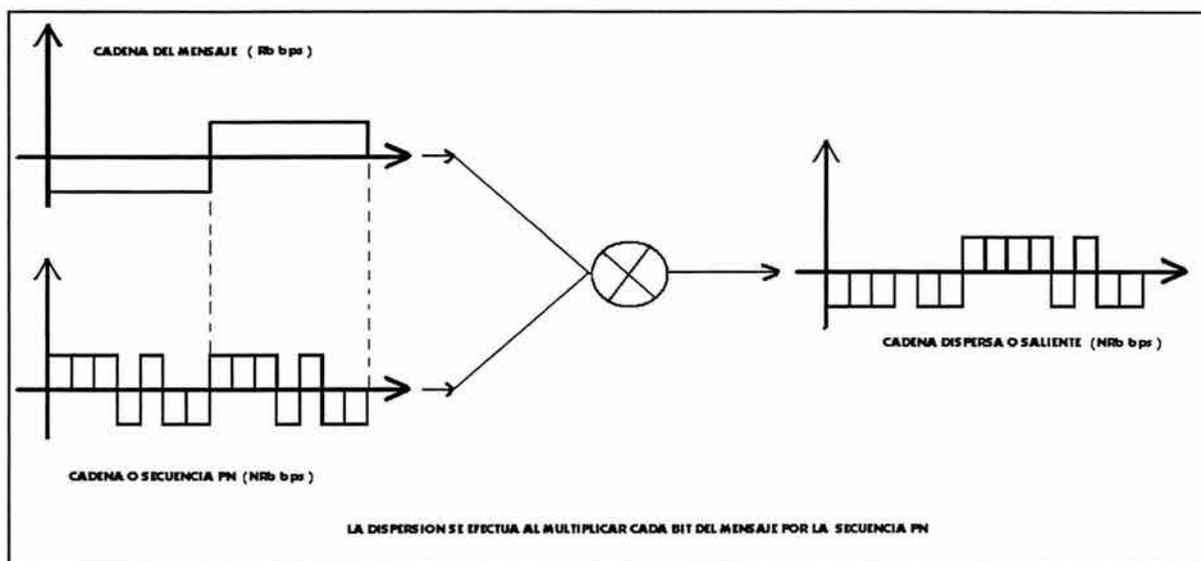


FIGURA 2.40 DISPERSIÓN DE LA SEÑAL MEDIANTE SECUENCIAS PN

Una de las ventajas de CDMA es que al dispersar el espectro, no es fácil interceptar la señal (tiene una baja probabilidad de interceptación o "LPI"), congestionarla o demodularla. Además debido a la dispersión, se transmite con una muy baja densidad espectral de potencia (en Watts por Hertz), en comparación con las señales de banda angosta, de tal suerte que ambos tipos de señales pueden coexistir en el mismo medio sin interferirse.

En una comunicación mediante CDMA, las demas señales esparcidas aparecen como un ruido de fondo, producto de la dispersión mediante códigos pseudo ruidosos (cuyo significado es que no representan realmente ruido gaussiano).

CDMA basa su éxito en la propiedad de no interferencia de los códigos ortogonales PN, pues la similitud de los códigos, expresada mediante la correlación cruzada es prácticamente cero. Matemáticamente el producto e integración en el tiempo de dos señales ortogonales da cero. Por consiguiente se aprovecha mucho mejor la capacidad del medio de comunicación.

Otras variantes de CDMA se realizan mediante:

- a) Salto de frecuencia (FH - CDMA),
- b) Salto de tiempo (TH - CDMA) y,
- c) Con Chirp.

A continuación, la figura 2.41 muestra el espectro de CDMA de secuencia directa.

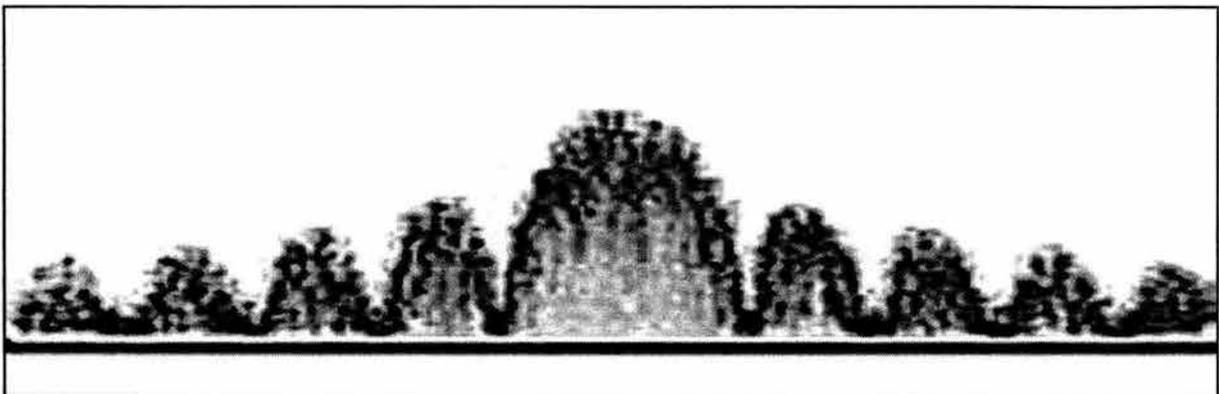


FIGURA 2.41 ESPECTRO DE CDMA CON SECUENCIA DIRECTA

2.8.1.3.6.1 CDMA CON SALTO DE FRECUENCIA

Es una variante de CDMA, conocida como FH - CDMA, que divide en subbandas el ancho total del transpondedor y el código digital de la estación se emplea para producir, de manera continua, el salto en frecuencia entre todas esas subbandas. El tiempo total asignado para transmitir, también es subdividido en pequeñas ranuras de tiempo. de esta forma se transmite en una frecuencia durante la primera ranura y en otra en la siguiente y así sucesivamente. De esta forma, las estaciones tienen diversos patrones de salto de frecuencia que varían en todo el ancho de banda del transpondedor (ver figuras 2.42

a) y b)). La modulación preferida en este caso es FSK.

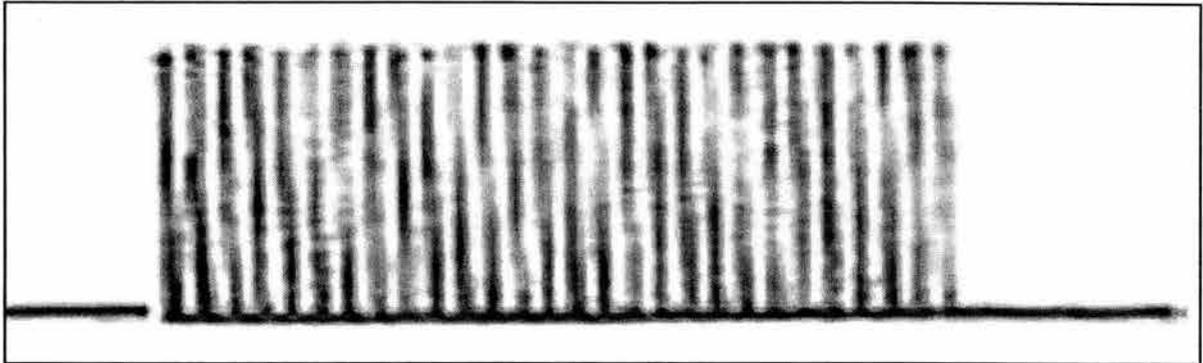


FIGURA 2.42 a) ESPECTRO DE FH - CDMA

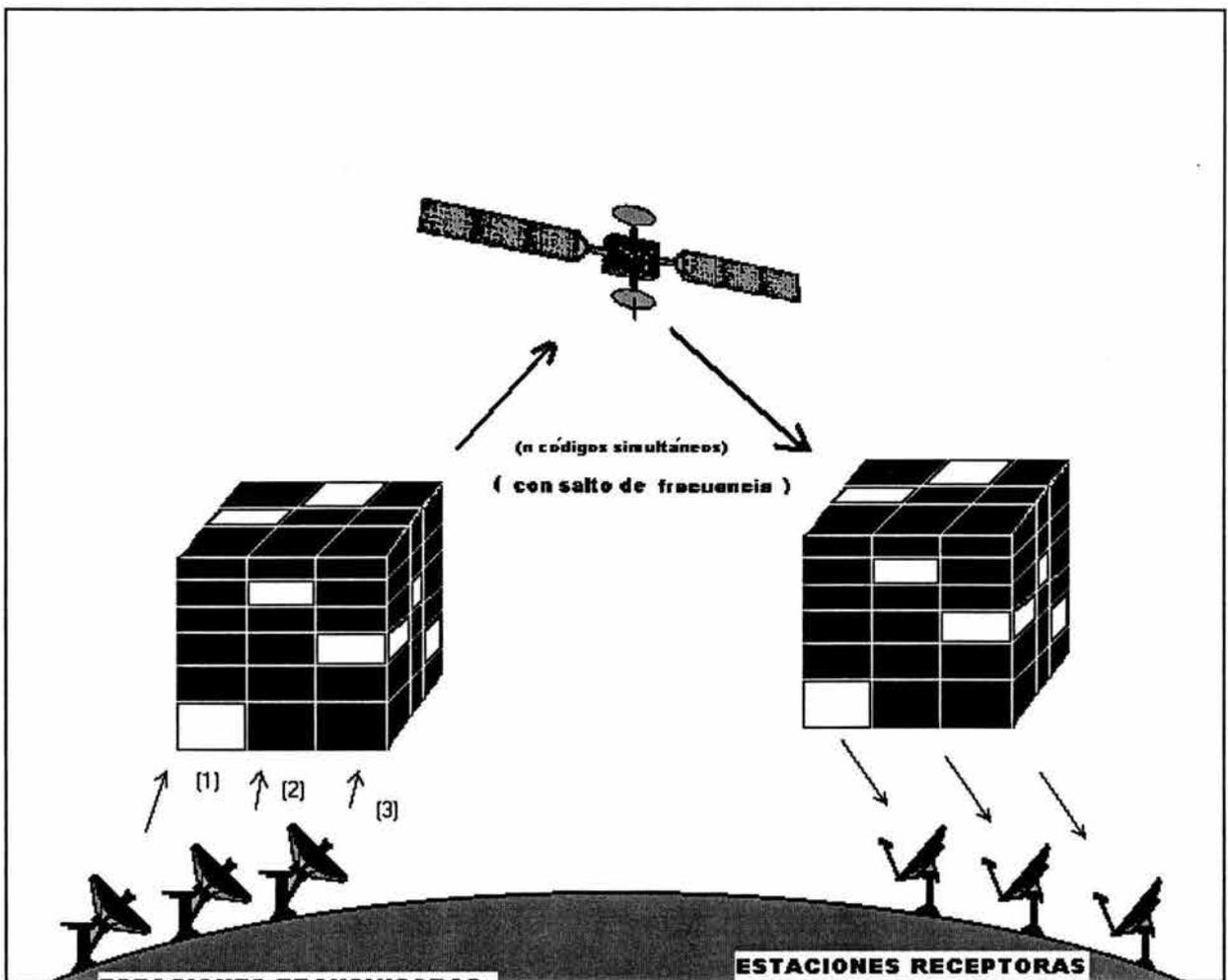


FIGURA 2.42 b) TRANSMISIÓN POR DIVISIÓN DE CÓDIGO CON SALTO DE FRECUENCIA

2.81.3.6.2 CDMA CON SALTO DE TIEMPO

Es una combinación de CDMA/TDMA, conocida como TH - CDMA, en la que se efectúa una transmisión aleatoria en alguna de las "n" ranuras de tiempo, de cada uno de los marcos de tiempo asignados a la red. La ranura de tiempo empleada está determinada por el código asignado al usuario. Existen "n" ranuras de tiempo, de muy corta duración, en cada uno de los "m" marcos de tiempo que emplea una red dada.

2.81.3.6.3 CDMA CON CHIRP

Esta opción emplea un pulso de barrido en frecuencia (denominado "CHIRP") para dispersar la señal. Por consiguiente, esta metodología se conoce como "Chirping" y es empleada preferentemente en el "RADAR" y sus aplicaciones que en las telecomunicaciones.

El éxito de CDMA se basa en que con ella se pueden manejar comunicaciones de banda ancha.

Las combinaciones teóricas de las tres primeras técnicas básicas (FDMA, TDMA y CDMA), permiten obtener cuatro técnicas más de acceso múltiple que se muestran en las figuras 2.43 y 2.44:

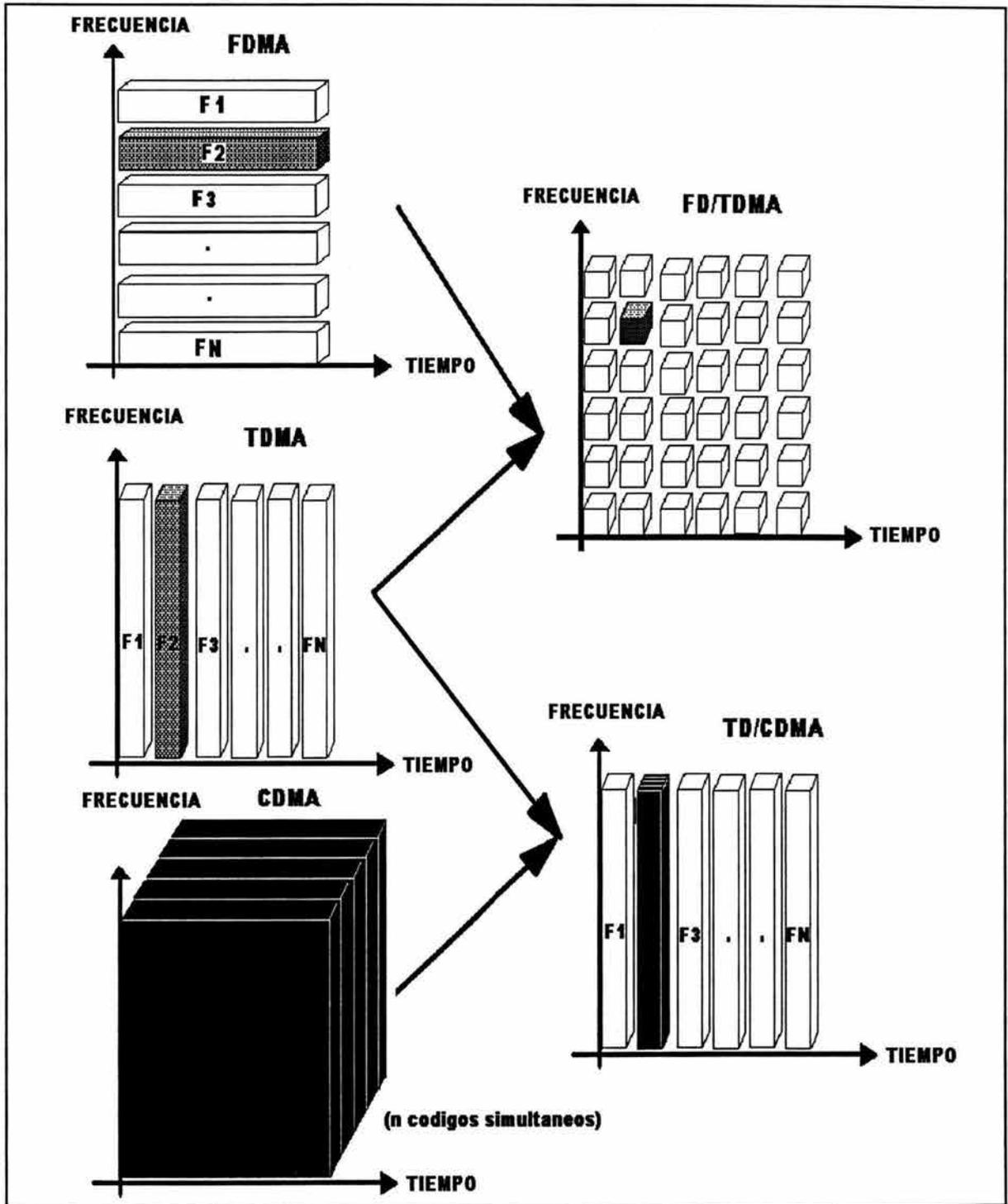


FIG. 2.43 COMBINACIONES BÁSICAS

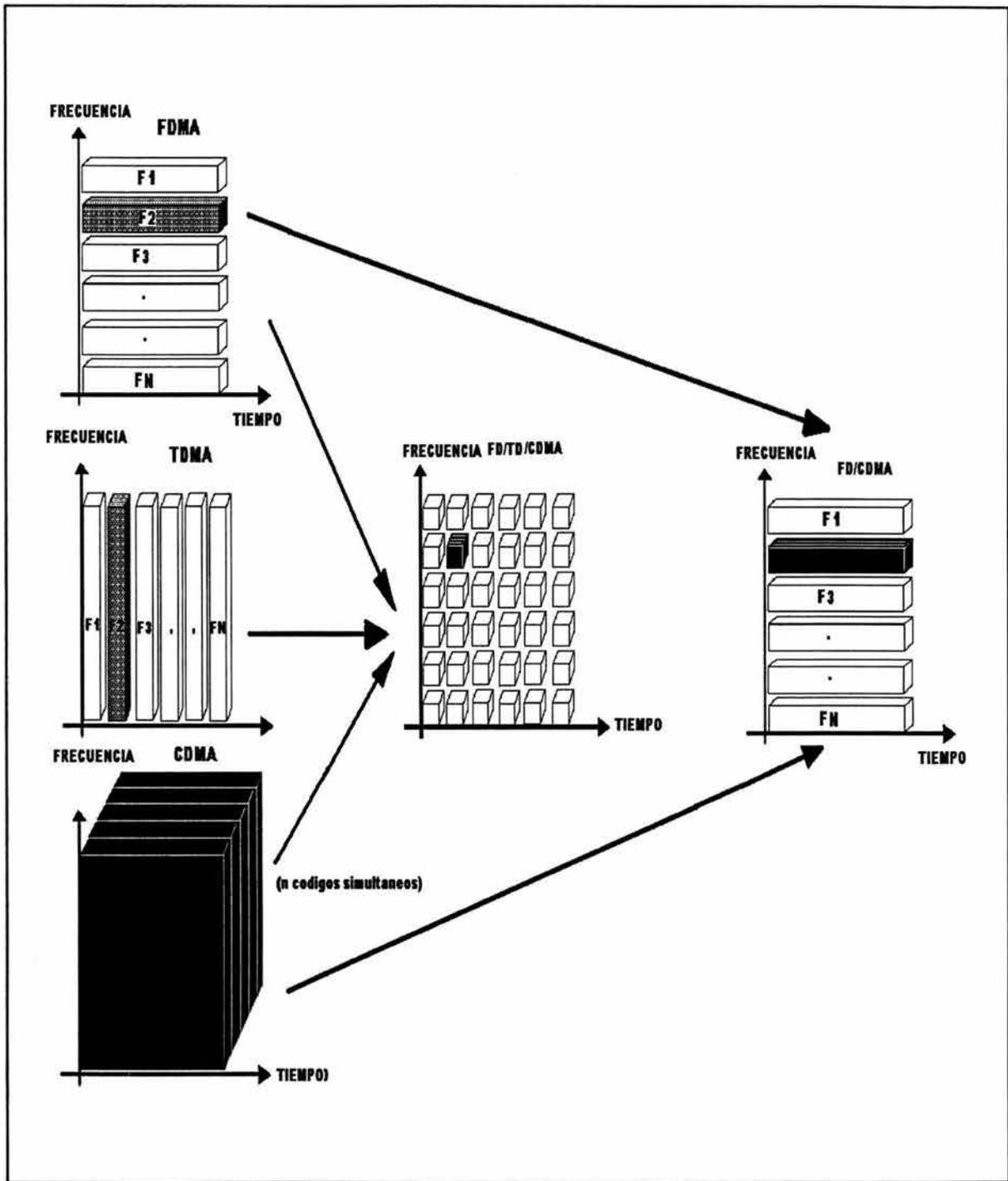


FIG. 2.44 COMBINACIONES ADICIONALES

2.8.1.3.7 COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ACCESO

Conforme la tecnología ha avanzado, se ha migrado de la primera técnica: FDMA, hacia TDMA y CDMA, para aprovechar las ventajas que brinda la tecnología digital. La información digital presenta ventajas con respecto de la información analógica, sobre todo en la facilidad de corrección de errores y la consecuente fidelidad de la información recibida.

2.8.1.3.7.1 VENTAJAS DE FDMA

- Es una técnica simple y la más antigua, con una confiabilidad que se apoya en el uso de equipos probados.
- No se requiere de sincronía entre las estaciones terrenas que conforman la red.
- Existe una gran cantidad de redes con esta tecnología que da servicio aceptable y resulta suficiente, como es el caso de las primeras redes de telefonía. El cambio de tecnología en casi todos los casos puede resultar más costoso y es mejor agotar la vida útil de los equipos, hasta que sea más barato utilizar las redes terrestres o esperar el auge de los sistemas satelitales de órbita baja que se considera revolucionarán las telecomunicaciones.

2.8.1.3.7.2 DESVENTAJAS DE FDMA

- Debido a la característica no lineal de amplificación del transpondedor, al emplear la técnica FDMA se amplifican las portadoras a diferentes frecuencias y en la salida se tiene no sólo la amplificación de las frecuencias originales sino también de señales indeseables en frecuencias que resultan de las combinaciones lineales de las frecuencias de entrada (productos de intermodulación, ver figura 2.45):

$$f_{1M} = m_1 f_1 + m_2 f_2 + \dots + m_N f_N$$

donde m_1, \dots, m_N son enteros negativos o positivos

- El ancho de banda se utiliza de manera ineficiente pues es necesario emplear "back - off's" en el amplificador del satélite,

así como las bandas de guarda entre espectros de portadoras, con lo que se abate los efectos indeseables de filtros y osciladores.

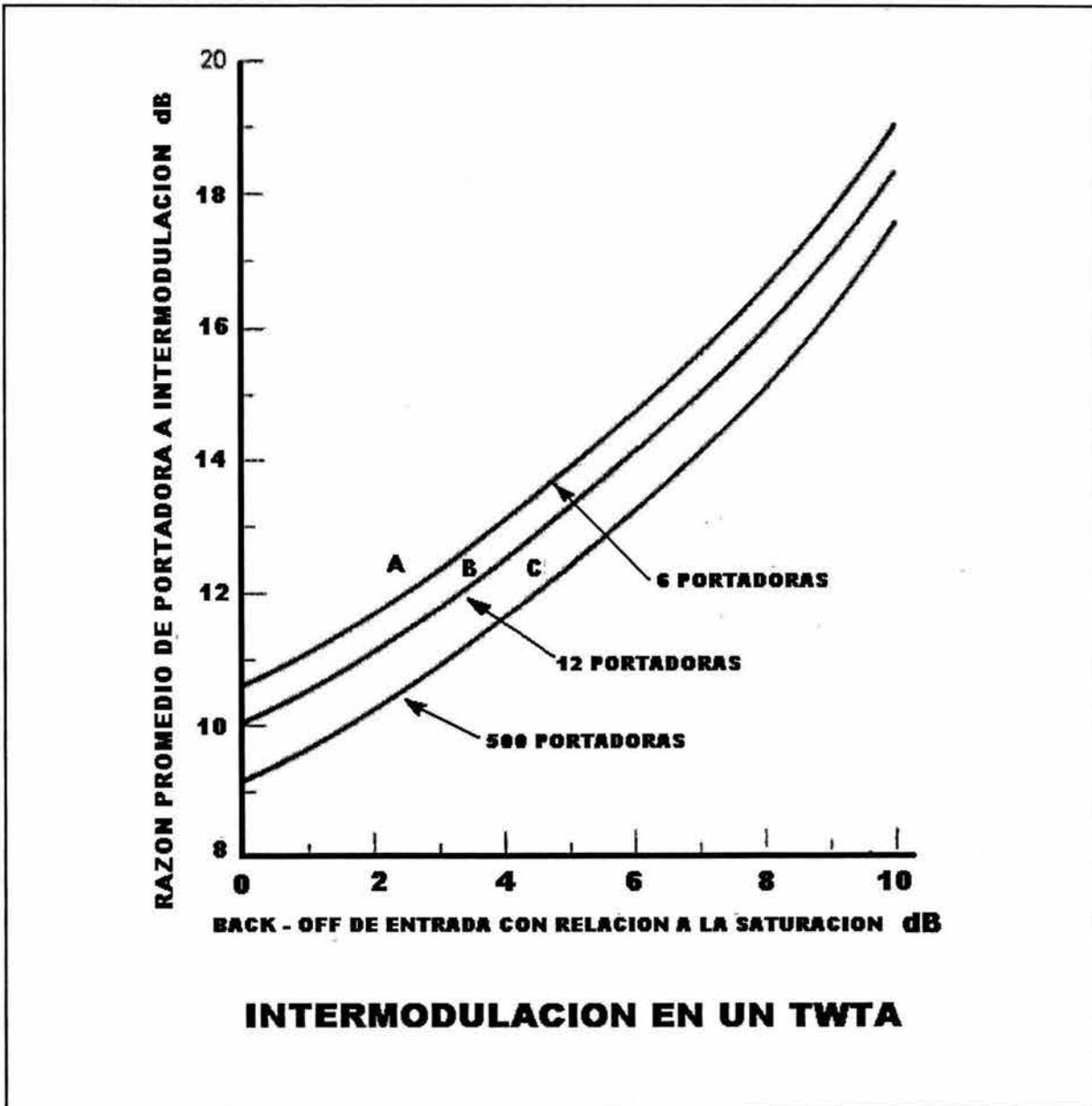


FIG. 2.45 INTERMODULACIÓN VS CANTIDAD DE PORTADORAS

- Falta de flexibilidad en caso de reconfiguración. Al variar la capacidad se requiere cambiar el plan de frecuencias que a su vez implica reasignar frecuencias de transmisión/recepción y cambio del ancho de banda de los filtros de las estaciones

terrenas.

- Falta de Capacidad. Cuando el número de accesos aumenta por la generación de productos de intermodulación y la necesidad de transmitir con una potencia reducida en el satélite (back off).
- Se requiere controlar la potencia de transmisión de las estaciones terrenas de tal manera que la potencia de entrada de la portadora en el satélite sea la misma en todos los casos para evitar el efecto de captura. Este control debe hacerse en tiempo real y adaptar los efectos de atenuación que causa la lluvia en los enlaces ascendentes.

2.8.1.3.7.3 VENTAJAS DE TDMA

- Sólo existe una portadora en un canal que ocupa todo su ancho de banda, evitándose los productos de intermodulación y la amplificación se puede trabajar a saturación (satélite y estaciones terrenas).
- No se requiere controlar la potencia de las estaciones terrenas que accesan al satélite.
- La sintonía se simplifica pues todas las estaciones transmiten en la misma frecuencia.
- El desempeño de la transmisión es alto para la mayoría de los accesos al satélite.

2.8.1.3.7.4 DESVENTAJAS DE TDMA

- Si se trabaja a saturación, la no linealidad del transpondedor, combinado con los procesos de filtrado, degrada la señal con respecto al desempeño del proceso ideal de transmisión digital.
- Se requiere un proceso de sincronía para el acceso al satélite. El equipo de sincronización es complejo.
- Se requiere un diseño y dimensionamiento específico de la estación terrena para trabajar con alto desempeño. Es decir, se requiere G/T grande en las estaciones terrenas, lo cual se puede lograr mediante antenas grandes que puedan saturar al transpondedor.

2.8.1.3.7.5 VENTAJAS DE CDMA

- No se requiere de un proceso de sincronía entre las estaciones terrenas de la red. Únicamente se requiere sincronizar la secuencia de la portadora recibida.
- Brinda fuerte protección contra interferencias de otros sistemas y contra interferencia por múltiples trayectorias.
- Es adecuada para redes de estaciones pequeñas, de patrones de radiación amplios.
- Es adecuada para comunicaciones móviles y servicios futuros tipo multimedia que requieren gran ancho de banda.

2.8.1.3.7.6 DESVENTAJAS DE CDMA

- Tiene un bajo desempeño si se compara el gran ancho de banda que emplea una portadora con el que requiere una señal de espectro no esparcido.
- La señal presenta un ruido de fondo y no tiene la gran claridad que presenta con TDMA.
- Está recomendado para sistemas que requieren seguridad o evitar interferencias, tal vez militares, y no es adecuado para grandes redes lo cual recae como desventaja comercial en ciertos casos.

A continuación se muestra un cuadro sinóptico de las técnicas de acceso a los canales.

2.9 RESUMEN DE TÉCNICAS DE ACCESO ALEATORIO A LOS CANALES DEL SATÉLITE

PROTOCOLOS DE ACCESO ALEATORIO		El acceso aleatorio a un recurso centralizado a través de un sATÉLITE es adecuado cuando las estaciones terrenas transmiten mensajes cortos entre intervalos grandes de tiempo muerto.
	ALOHA	Los mensajes se transmiten casi sin restricciones y ocupan todo el ancho de banda del canal asignado. Bajo el esquema TDM/TDMA.
		La desventaja en este esquema básico es la colisión de mensajes y la necesidad de retransmisión de paquetes.
		El canal se ranura en tiempo, de tal manera que los usuarios ya no transmiten aleatoriamente sino al principio de intervalos discretos de tiempo.
	ALOHA RANURADO	Con esta técnica se decrece la probabilidad de interferencia entre paquetes. Actualmente es el protocolo más empleado.
		En la modalidad de acceso aleatorio, presenta un retraso breve con los datos interactivos sensitivos al tiempo. En la modalidad de batch para la transmisión voluminosa de datos tiene un "alto desempeño".
	AA/TDMA (Adaptive Assignment of TDMA	Tiene control de flujo para evitar la inestabilidad durante las congestiones. Los parámetros del sistema son controlables y se optimiza el desempeño.

CAPÍTULO 3. LAS COMUNICACIONES SATELITALES EN MÉXICO

3.1 ANTECEDENTES BÁSICOS

Las comunicaciones via satélite han tenido un gran desarrollo a través de los sistemas geoestacionarios. Como avance tecnológico han surgido recientemente las constelaciones satelitales de órbitas bajas y medias que permiten cobertura total en la superficie terrestre.

La era espacial fue inaugurada en 1957 con el lanzamiento del satélite ruso Sputnik 1. Con ello dió inicio la investigación y desarrollo de la tecnología satelital.

La primera comunicación intercontinental de telefonía y televisión tuvo lugar con el satélite de órbita baja Telstar lanzado en junio de 1961. Para junio de 1963 la Nasa lanza el primer satélite geosincrónico denominado Syncom 2, seguido del Syncom 3 en agosto de 1963. Este último permitió transmitir las olimpiadas de Tokio en 1964. Dado el gran éxito de este tipo de comunicaciones, en agosto de 1964 se funda el consorcio INTELSAT para comercializar las comunicaciones vía satelites geoestacionarios, y en 1965 se lanza el Early Bird que se constituye como el primer satélite geostacionario de tipo comercial y experimental.

En 1968 México entra en la era espacial con la construcción y operación de una estación terrena en el estado de Hidalgo y para 1981 arrenda segmentos satelitales a INTELSAT.

Para esas épocas la utilidad de las comunicaciones vía satélite era un hecho comprobado a nivel mundial. México y otros países de Latinoamérica pronto adquirirían sus propios sistemas satelitales.

A continuación se muestra un cuadro sinóptico de las comunicaciones vía satélite en México.

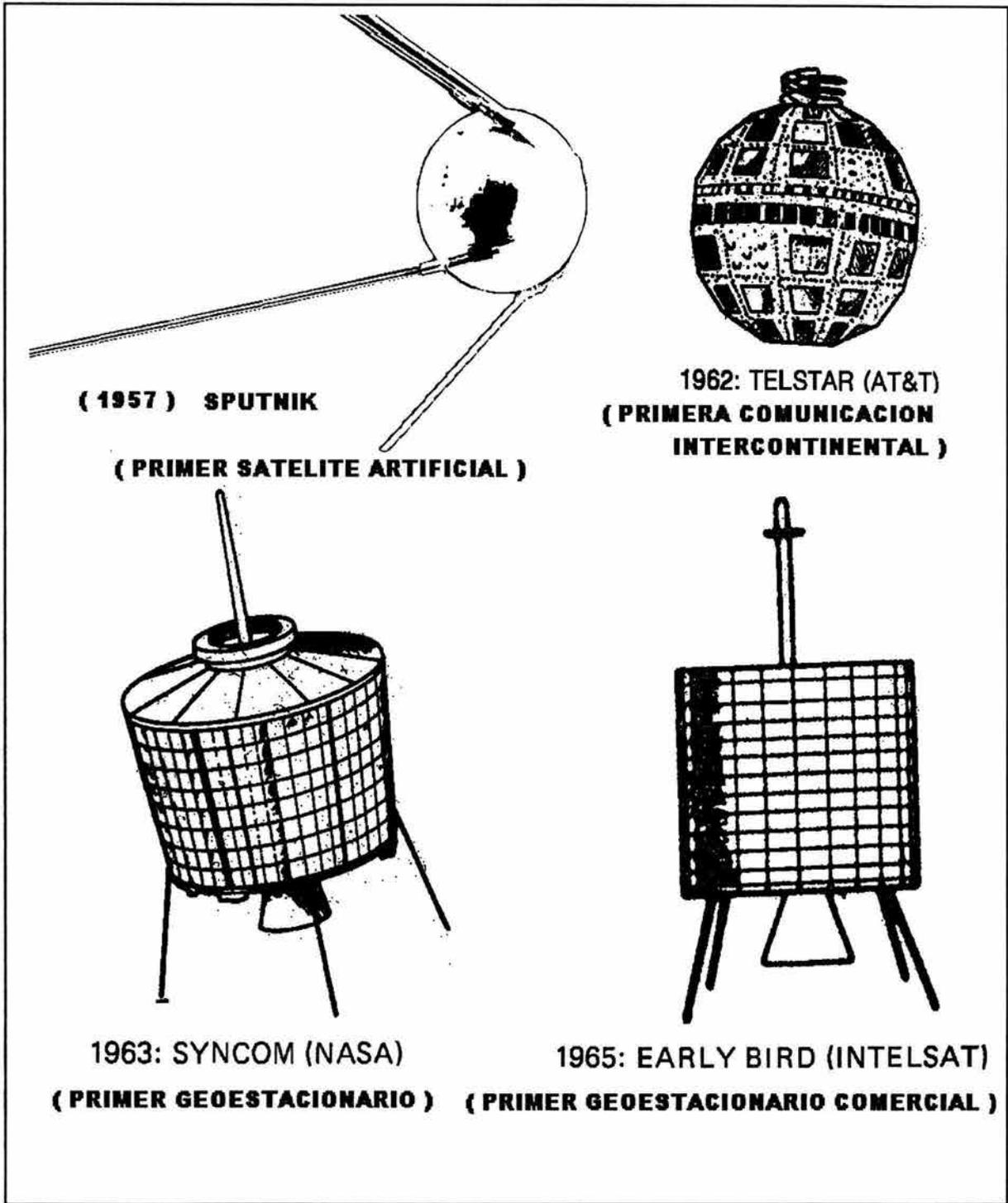


FIGURA 3.1 LOS PRIMEROS SATÉLITES

3.2 LAS COMUNICACIONES SATELITALES EN MÉXICO

CRONOLOGÍA DEL DESARROLLO	ANTECEDENTES	EN 1968 SE INSTALA LA ESTACIÓN TERRENA DE TULANCINGO, HIDALGO, ARRENDANDO SERVICIOS A INTELSAT, POSICIÓN 53°		
		SE CONSTRUYE EL CENTRO DE CONTROL DE SATÉLITES EN IZTAPALAPA: "CONTEL"		
	LOS PRIMEROS SATÉLITES: LOS MORELOS BANDA C y Ku	<table border="1"> <tr> <td>JUNIO DE 1985 SE LANZA MORELOS I, SE RETIRA EN MARZO DE 1994</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> - POSICIÓN 113.5 W. - 4 TRANSPONDERS DE 36 MHZ - SÓLO SERV. FIJO NACIONAL. </td> </tr> </table>	JUNIO DE 1985 SE LANZA MORELOS I, SE RETIRA EN MARZO DE 1994	<ul style="list-style-type: none"> - POSICIÓN 113.5 W. - 4 TRANSPONDERS DE 36 MHZ - SÓLO SERV. FIJO NACIONAL.
JUNIO DE 1985 SE LANZA MORELOS I, SE RETIRA EN MARZO DE 1994	<ul style="list-style-type: none"> - POSICIÓN 113.5 W. - 4 TRANSPONDERS DE 36 MHZ - SÓLO SERV. FIJO NACIONAL. 			
		<table border="1"> <tr> <td>NOV. DE 1985 SE LANZA MORELOS II, SE RETIRA EN JUNIO DE 2004.</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> - POSICIONES 116.8°, 120.5 W. - OPERATIVO EN SEPT. DE 1989 - SERV. NACIONAL Y REGIONAL - 1998 SERVICIO A ALASKA. - 2002-4 F.I. UNAM. </td> </tr> </table>	NOV. DE 1985 SE LANZA MORELOS II, SE RETIRA EN JUNIO DE 2004.	<ul style="list-style-type: none"> - POSICIONES 116.8°, 120.5 W. - OPERATIVO EN SEPT. DE 1989 - SERV. NACIONAL Y REGIONAL - 1998 SERVICIO A ALASKA. - 2002-4 F.I. UNAM.
NOV. DE 1985 SE LANZA MORELOS II, SE RETIRA EN JUNIO DE 2004.	<ul style="list-style-type: none"> - POSICIONES 116.8°, 120.5 W. - OPERATIVO EN SEPT. DE 1989 - SERV. NACIONAL Y REGIONAL - 1998 SERVICIO A ALASKA. - 2002-4 F.I. UNAM. 			
	AMPLIACIÓN DE INFRAESTRUCTURA TERRESTRE	<ul style="list-style-type: none"> - SIMULADOR DINÁMICO DE SATÉLITES, LAB. DE PRUEBAS Y AMPLIACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO. - SE CONSTRUYE EL CENTRO ALTERNO DE CONTROL EN HERMOSILLO SONORA. 		
		<table border="1"> <tr> <td>SOLIDARIDAD I (NOV 93 - AGOST 00)</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> - POSICIÓN 109.2° W. - Falla prematuramente. </td> </tr> </table>	SOLIDARIDAD I (NOV 93 - AGOST 00)	<ul style="list-style-type: none"> - POSICIÓN 109.2° W. - Falla prematuramente.
SOLIDARIDAD I (NOV 93 - AGOST 00)	<ul style="list-style-type: none"> - POSICIÓN 109.2° W. - Falla prematuramente. 			
	SATÉLITES ACTIVOS BANDAS L, C y Ku (VIDA: 14 AÑOS), coms. móviles y fijas.	<table border="1"> <tr> <td>SOLIDARIDAD II (OCT. 1994)</td> <td>- POSICIÓN 113° W.</td> </tr> </table>	SOLIDARIDAD II (OCT. 1994)	- POSICIÓN 113° W.
SOLIDARIDAD II (OCT. 1994)	- POSICIÓN 113° W.			
		<table border="1"> <tr> <td>SATMEX V (JUN. 1999)</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> - POSICIÓN 116.8 W. - CUBRE CONT. AMERICANO </td> </tr> </table>	SATMEX V (JUN. 1999)	<ul style="list-style-type: none"> - POSICIÓN 116.8 W. - CUBRE CONT. AMERICANO
SATMEX V (JUN. 1999)	<ul style="list-style-type: none"> - POSICIÓN 116.8 W. - CUBRE CONT. AMERICANO 			
<p>A partir del 2000 los sistemas de comunicación móviles tienden a generalizarse y la conexión a Internet vía satélite gana popularidad. En 2003 se lanza el Satmex 6 a la órbita 109.2 Oeste.</p>				



FIGURA 3.2 ANTENAS DE CONTROL DE SATÉLITES INSTALADAS EN CONTEL (IZTAPALAPA)

El gobierno estatal, a través de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes "SCT", en 1968 construye y opera en el estado de Hidalgo la primera estación terrena del país para la transmisión de los Juegos Olímpicos; para 1970 arrendó servicios a INTELSAT para servicios domésticos y en 1982 la demanda le hizo contratar con Hughes su propio sistema satelital geostacionario denominado Morelos (dos satélites estabilizados por giro modelo HS 376) y se inicia la construcción del centro de control primario de satélites en el conjunto denominado CONTEL, ubicado en Iztapalapa.



FIGURA 3.3 SATÉLITES MEXICANOS

En junio de 1985 fue lanzado el Morelos I desde cabo cañaveral con

el transbordador de la NASA), para brindar cobertura nacional en la posición 113 W. Este satélite operó hasta marzo de 1994.

El Morelos II se lanza desde cabo cañaveral en noviembre de 1985 utilizando el transbordador Atlantis. En esa misión participa el primer astronauta mexicano y el satélite se coloca en una órbita de almacenamiento para posteriormente en 1989 reubicarse en la posición 116.8 W para brindar cobertura nacional. Este satélite opera hasta 1998 en órbita geoestacionaria y, posteriormente, gracias a la habilidad de los técnicos mexicanos, en órbita inclinada en la posición 120.5 W para dar servicio a Alaska; por último, en octubre de 2002 ya no es utilizado por Alaska y se asigna a la Facultad de Ingeniería de la UNAM para investigación académica, se estimó retirarlo a mediados de 2004.

De 1985 a 1997 se amplió la flota satelital y se construyó el centro de control alterno de Hermosillo Sonora. En 1989 se crea Telecomm "Telecomunicaciones de México", como organismo descentralizado para operar el sistema Morelos.

En 1991 Telecomm contrata con Hughes la construcción del sistema de satélites geoestacionarios denominados Solidaridad (dos satélites de estabilización triaxial modelo HS 601, con servicios en banda C para Latinoamérica y el sur de Estados Unidos, así como banda Ku para México y Estados Unidos. En noviembre de 1993 y octubre de 1994 se lanzan desde Kouru, en la Guyana Francesa, los satélites Solidaridad I y II, mediante cohetes Ariane a las posiciones orbitales 109.2 y 113 W respectivamente. A finales del 2000 un cortocircuito en los relevadores del procesador redundante SCP2 del Solidaridad I causan que se pierda operativamente dicho satélite.

En 1995 se solicita a Hughes la construcción del Morelos 2R, posteriormente denominado Satmex 5 y se inicia el proceso de privatización de Telecomm que en junio se le renombra como Satmex; para noviembre de 1997, la empresa mexicana denominada

"Principia", en alianza con "Loral Space & Communications" adquieren el 75% de los bienes de Telecomm y se funda Satmex como empresa privada con 25% de participación del gobierno.

En diciembre de 1998 se lanza desde Kouru, en la Guyana Francesa, el satélite Satmex 5, mediante un cohete Ariane a la posición orbital 116.8.

En el 2001 se promueve el interés en la tecnología satelital con la inauguración de una sala de 1330 m² en el museo de las ciencias de la UNAM ("UNIVERSUM"). Además se solicita la construcción del Satmex 6 que será lanzado en 2004 a la posición orbital 109.2 W.

Actualmente "Loral" ha constituido una alianza con cobertura global que incluye Satmex, Skynet, Europe*Star, Skynet do Brasil y Stellan. Para finales del 2002 esta alianza cuenta con 16 satélites en órbita.

A partir del desastre del transbordador espacial en 1986, se optó por que la mayoría de los satélites fuesen colocados en órbita mediante cohetes; mientras tanto el transbordador ha sido rediseñado y sólo se emplea en actividades gubernamentales estratégicas de los Estados Unidos de Norteamérica.

El proceso de instalación en órbita de un satélite "tipo solidaridad o el Satmex5", es un proceso burocrático que por lo general tarda de 5 a 7 años en lo que se definen sus características, capacidad, cobertura y se selecciona el proveedor, y se coordinan asignación y uso de frecuencias con la UIT, sin embargo, una vez adquirido, su embarque, transportación, lanzamiento y maniobras para colocarlo en órbita dura alrededor de dos meses.

Diversos países del continente americano han colocado en órbita satélites según se menciona a continuación:

- 1.- Canadá ha colocado 16 satélites para servicios diversos,

algunos de ellos ya convertidos en chatarra espacial.

2.- Estados Unidos 658 satelites con aplicaciones diversas, muchos de los cuales han salido de operación.

3.- México 5 satelites con servicios principalmente comerciales, 3 de ellos inutilizables a mediados de 2004.

4.- Argentina 1

5.- Brasil 6

Además algunos países europeos y diversos consorcios internacionales de satélites tienen cobertura hacia el continente americano, por ejemplo:

a.- España

b.- Francia

c.- Consorcios internacionales como Intelsat que asigna 4 satélites para cubrir parte del continente, Panamsat que asigna 2 y el sistema inmarsat de cobertura global.

3.3 SATÉLITES MEXICANOS EN OPERACIÓN

Los satélites mexicanos activos a inicios de 2004 se muestran en la fig. 3.3 y son:

a) El Morelos II, la mayor parte de su vida útil en órbita geoestacionaria, luego en órbita inclinada prestó servicios al Noroeste de los Estados Unidos de Norteamérica y a Alaska. A partir de noviembre de 2002, fue asignado para investigación en la UNAM.

b) Solidaridad 2

c) Satmex5

La cobertura del Solidaridad II se muestra en las fig. 3.4 a 3.6:

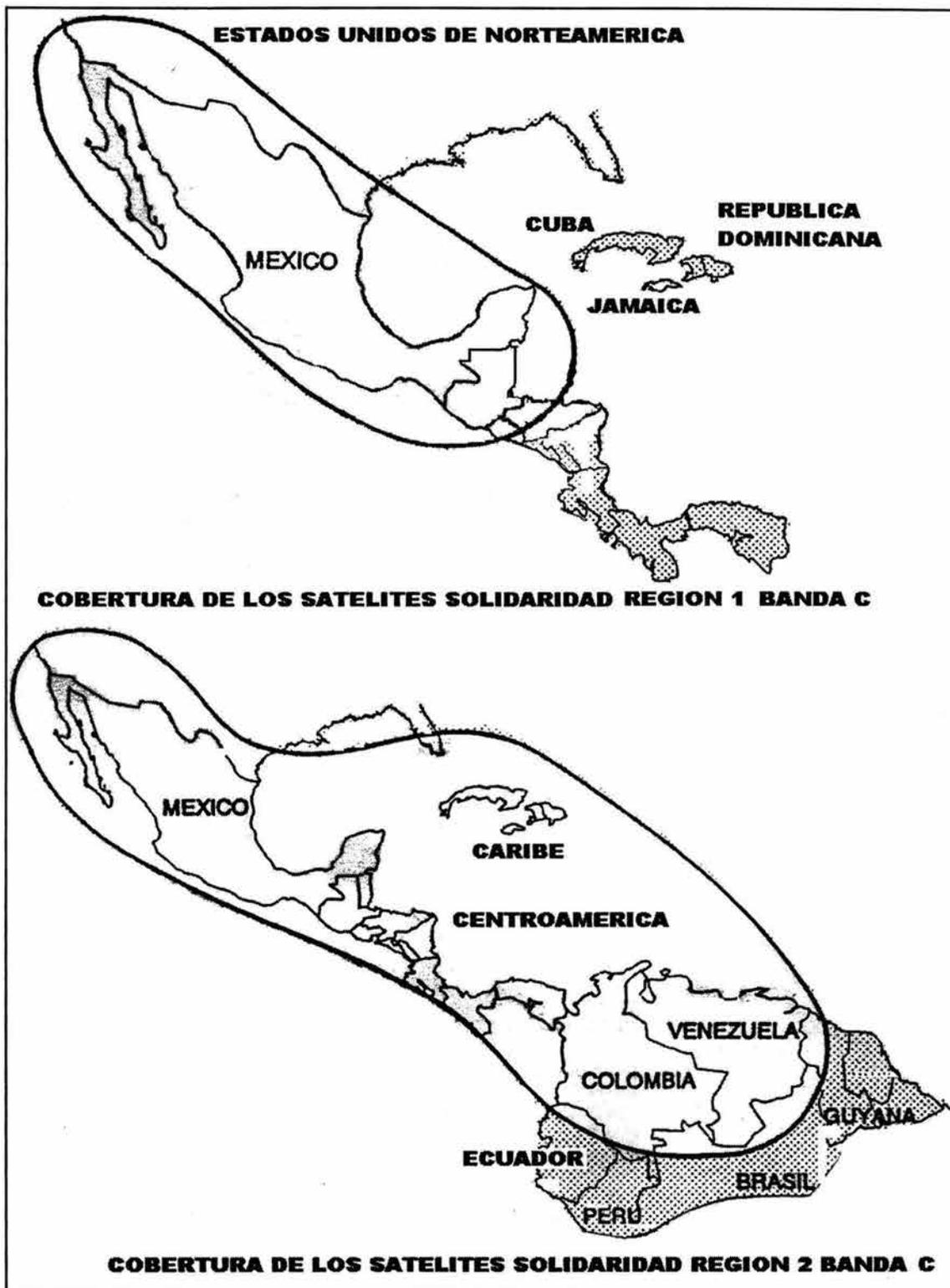


FIGURA 3.4 COBERTURA DEL SISTEMA SOLIDARIDAD EN BANDA C

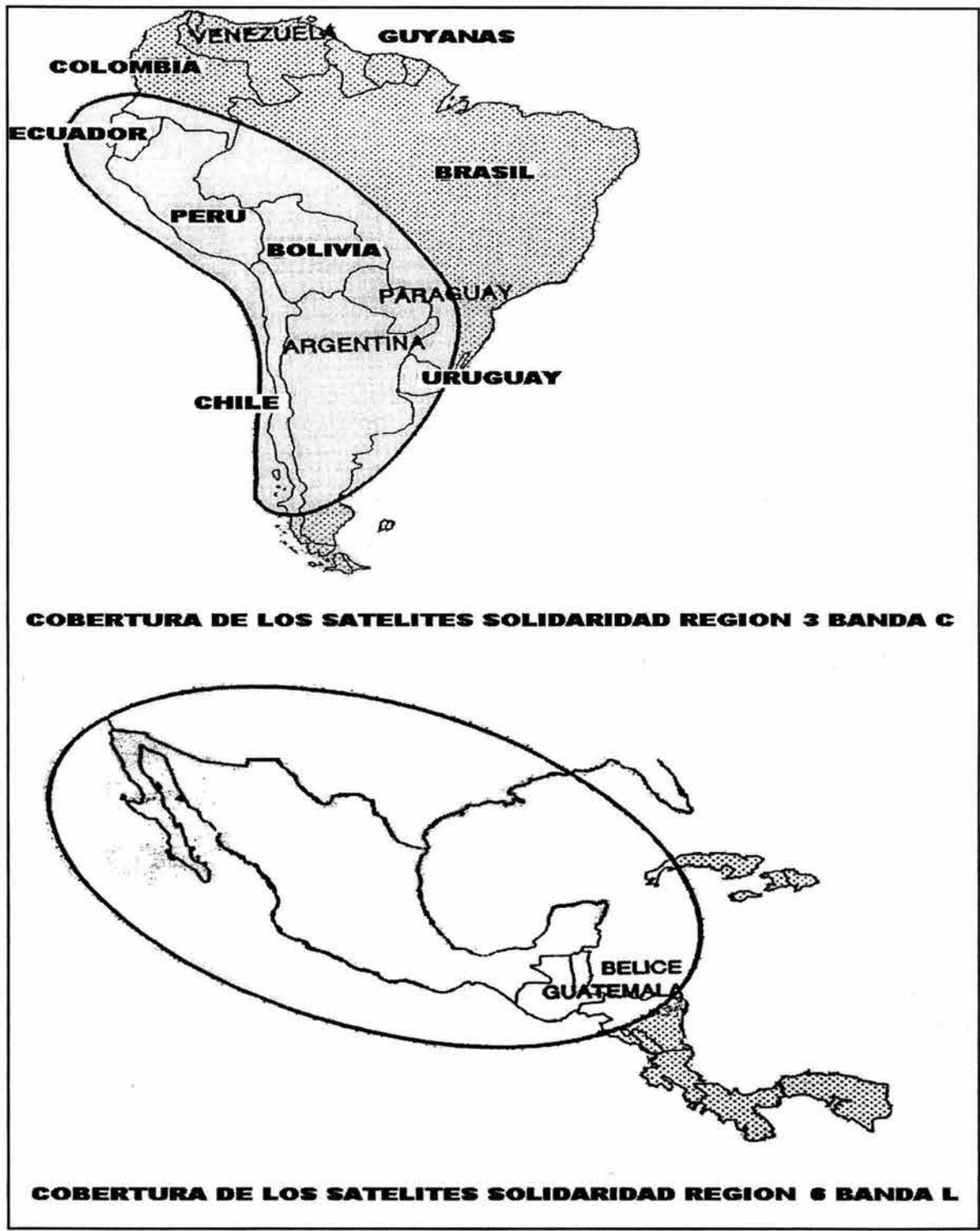


FIGURA 3.5. COBERTURA DEL SOLIDARIDAD 2 EN BANDA L

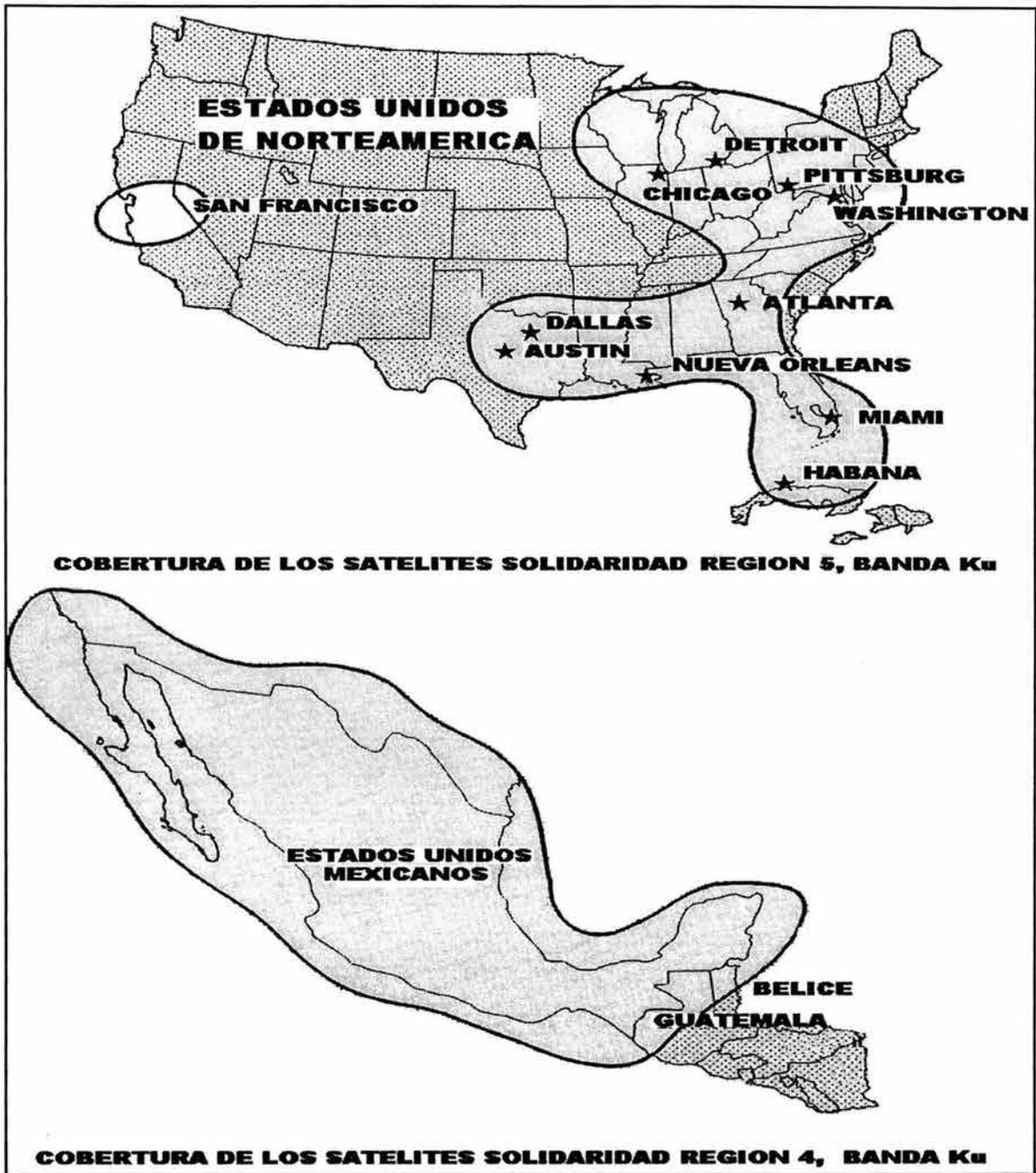


FIGURA 3.6. COBERTURAS DEL SOLIDARIDAD 2 EN REGIONES 4 Y 5

3.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL SUBSISTEMA DE COMUNICACIONES DEL SATÉLITE SOLIDARIDAD 2			
DATOS	BANDA L	BANDA C	BANDA Ku
TOTAL DE TRANSPONEDORES	1 DE 13.5 MHz EN SOL. 1	16 DE 54 MHz	12 DE 36 MHz (N)
	1 DE 13 MHz EN SOL. 2		6 DE 72 MHz (W)
ESPACIAMIENTO DE LOS TRANSPONEDORES		40 MHz (N)	61 MHz
		80 MHz (W)	
POTENCIA DE SALIDA	PIRE = 45.5 dBw	PIRE = 37.5 dBw (N)	PIRE = 47 dBw
	6 SSP's DE 24 watts	PIRE = 40 dBw (W)	20 TWT DE 45 watts
		16 SSP's de 10 a 16 watts	
		8 SSP'S de 14.4 watts	
BANDAS DE TRANSMISIÓN	1.525 - 1.559 GHz	3.7 - 4.2 GHz	11.7 - 12.2 GHz
BANDAS DE RECEPCIÓN	1.626 - 1.66 GHz	5.925 - 6.425 GHz	14 - 14.5 GHz
CAPACIDAD DEL ATENUADOR	0 - 15 dB con incremento de 1 dB	0 - 14 dB con incremento de 2 dB.	0 - 22 dB con incremento de 2 dB

TABLA 2. SUBSISTEMAS DEL SOLIDARIDAD 2

3.3.1.1 BANDA C EN EL SOLIDARIDAD 2

En banda C se tiene un rango de frecuencias que va de 5.925 a 6.425 GHz y se cuenta con 12 canales angostos de 36 MHz para recibir con polarización horizontal y transmitir con polarización vertical en la región R1. También con 6 canales amplios de 72 MHz para recibir con polarización vertical y transmitir con polarización horizontal en la región R1. Además se puede seleccionar haces para las regiones R2 y R3.

COBERTURA DEL SATÉLITE SOLIDARIDAD 2		
REGIÓN 1	BANDA C	México, Sur de los EUA, Guatemala, Belice, Honduras y el Salvador
REGIÓN 2	BANDA C	Incluye región 1, el sur de Florida, el Caribe, Centroamérica, Colombia y Venezuela.
REGIÓN 3	BANDA C	Sur de Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Paraguay, Uruguay, Chile, oeste de Brasil y Argentina.
REGIÓN 4	BANDA Ku	Igual que la región 1 con excepción de Honduras y el Salvador.
REGIÓN 5	BANDA Ku	Toronto, Canadá, La Habana, y las ciudades más importantes de los EUA.
REGIÓN 6	BANDA L	México y su mar patrimonial.

TABLA 3. COBERTURAS DEL SOLIDARIDAD

En el Solidaridad 2 se puede conmutar cualquiera de los canales 5N, 7N, 9N y 11N para que transmitan hacia R1 o R3; los canales 2N, 4N, 6N, 8N, 10N y 12N cubren exclusivamente a R2. En este satélite se puede conmutar cualquiera de los canales del 5N al 12N para que reciban de R1, R2 o R3 y adicionalmente los canales 11N y 12N pueden recibir simultáneamente de las regiones R2 y R3.

3.3.1.2 BANDA Ku EN EL SOLIDARIDAD 2

En banda Ku se tiene un rango de frecuencias que va de 14.000 a 14.500 GHz para el enlace ascendente y de 11.700 a 12.200 GHz para el enlace descendente; se cuenta con 16 canales de 54 MHz 8 de ellos reciben con polarización horizontal y 8 reciben con polarización vertical de las regiones R4 y R5. Los canales 5K, 6K y 9K incluyen un linealizador para mejorar su desempeño con multiporadoras. El canal 5K puede programarse de la siguiente manera:

- R4 ascendente R4 descendente
- R4 ascendente R5 descendente
- R5 ascendente R4 descendente
- R5 ascendente R5 descendente

mientras que el canal 8K sólo de la siguiente manera:

- R4 ascendente R4 descendente
- R5 ascendente R4 descendente

El centro de control genera una señal en banda Ku sin modular, de amplitud constante y gran estabilidad en frecuencia (+ - 0.3 ppm) que el satélite retransmite (transmisor de radiofaro o beacon con redundancia 2:1) y que permite el apuntamiento de las antenas terrestres hacia el satélite al establecer un nivel de referencia de portadoras a nivel usuario y, con referencia en el beacon, controlar la potencia del enlace ascendente y compensar su nivel cuando las condiciones atmosféricas son adversas.

3.3.1.3 BANDA L EN EL SOLIDARIDAD 2

La banda L se emplea para las comunicaciones móviles y tiene un rango de frecuencias que va de 1515.0 a 1599.0 MHz para el enlace descendente y de 1626.5 a 11660.5 MHz para el enlace ascendente; ésta banda utiliza un ancho de banda remanente de un canal de 27 MHz de la banda Ku y se divide en tres subbandas en el solidaridad 2 que se controlan independientemente con un ancho de 2.5 a 8 MHz.

Una estación terrena con diversos usuarios establece el enlace ascendente en banda Ku, el satélite traslada la frecuencia de Ku/FI a FI/L y retransmite las señales en banda L a los usuarios móviles en tierra, mar y aire a través de las 26 antenas dipolo tipo copa. Los usuarios móviles generan una señal en banda L que reciben las antenas dipolo y se efectúa la traslación de L/FI a FI/Ku y se regresa las señales en banda Ku hacia la estación terrena.

La banda L sólo se puede emplear en áreas donde se efectúa la coordinación de frecuencias debido a sus características de propagación.

SOLIDARIDAD II EN LA REGIÓN I								
BANDA C			HORIZONTAL/VERTICAL			VERTICAL/HORIZONTAL		
			Ang	Ang	Ang	Amp	Amp	Amp
LUGAR	LONG (grados)	LAT (grados)	PIRE (dBw)	DFS (dBw/m ²)	G/T (dB/°K)	PIRE (dBw)	DFS (dBw/m ²)	G/T (dB/°K)
Acapulco	99.55	16.51	37.6	-94.5	5.1	41	89	2.2
Aguascalientes	102.03	21.86	39.7	-98.9	9.5	42.8	94.3	7.5
Campeche	90.48	19.85	39.8	-96.9	7.5	43.2	91.4	4.6
Cancún	86.46	21.05	38	-95.2	5.7	41.4	90	3.2
Cd. Juárez	106.29	31.44	41.4	-94.7	5.2	41.9	92.2	5.5
Chetumal	88.18	18.3	39.4	-97.5	8	42.3	91.8	5
Chihuahua	106.06	28.65	41.8	-97	7.6	42.9	94.5	7.7
Coatzacoalcos	94.45	18.2	40.1	-97.1	7.6	43.3	92.3	5.5
Ensenada	116.37	31.52	39.4	-94.5	5	41.7	91.1	4.3
Guadalajara	103.2	20.4	38.6	-97.7	8.2	41.9	92.5	5.7
Guatemala	90.31	14.38	38.3	-96.5	7	41.1	89.9	3.1
La Paz	110.18	24.1	38.7	-93.8	4.3	41.1	90.8	4
León	101.25	21.07	39.5	-98.7	9.2	42.8	93.9	7.1
Los angeles	118.15	34.03	38.5	-94.4	4.9	41	89.8	3
Matamoros	97.3	25.53	39.8	-98.6	9.2	42.9	93.3	6.5
Mérida	89.37	20.58	39.2	-96	6.5	42.8	90.4	3.6
Mexicali	115.45	32.65	40	-94.6	5.1	41.9	91.6	4.8
México D.F.	99.01	19.24	39.4	-97.6	8.1	42.9	92.6	5.8
Monterrey	100.19	25.4	40.7	-99.7	10.3	43.3	94.9	8.2
Nuevo Laredo	99.31	27.3	40.3	-98.8	9.3	42.6	93.2	6.4
Oaxaca	96.73	17.07	39.2	-95.8	6.3	42.5	91.2	4.4
Pto escondido	97.1	15.5	38.3	-94.4	4.9	41.5	89.9	3.1
Pto Vallarta	105.15	20.37	37.7	-96.4	6.9	40.9	90.9	4.2
Puebla	98.2	19.03	39.6	-97.3	7.8	43	92.4	5.6

TABLA 4. REGIÓN I PARA EL SOLIDARIDAD

SOLIDARIDAD II EN LA REGIÓN I								
BANDA C			HORIZONTAL/VERTICAL			VERTICAL/HORIZONTAL		
			Ang.	Ang.	Ang.	Amp	Amp	Amp
LUGAR	LONG (grados)	LAT (grados)	PIRE (dBw)	DFS (dBw/m ²)	G/T (dB/°K)	PIRE (dBw)	DFS (dBw/m ²)	G/T (dB/°K)
San Antonio	98.31	29.28	39.2	-97.3	7.9	41.4	90.1	3.3
San Luis Pot.	100.98	22.15	40	-99.4	9.9	43.3	94.8	8
Tampico	97.85	22.21	40.3	-98.9	9.4	43.8	94.3	7.5
Tapachula	92.17	14.54	38.8	-96.3	6.9	41.7	90.6	3.8
Tijuana	117.01	32.32	39.3	-94.6	5.1	41.6	90.8	4
Toluca	99.67	19.28	39.2	-97.4	7.9	42.7	92.3	5.5
Torreón	103.45	25.53	41.1	-99.2	9.7	43.2	95.6	8.8
Tuxtla	93.07	16.45	39.8	-97	7.6	42.8	91.9	5.1
Veracruz	96.08	19.12	40.1	-97.3	7.9	43.5	92.6	5.8
Villahermosa	92.55	17.59	40.1	-97.3	7.9	43.2	92.3	5.5

TABLA 5. REGIÓN II PARA EL SOLIDARIDAD

3.4 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SATMEX V,VI

A continuación se resume las aplicaciones del Satmex V y en las figuras 3.7 a 3.9 su cobertura.

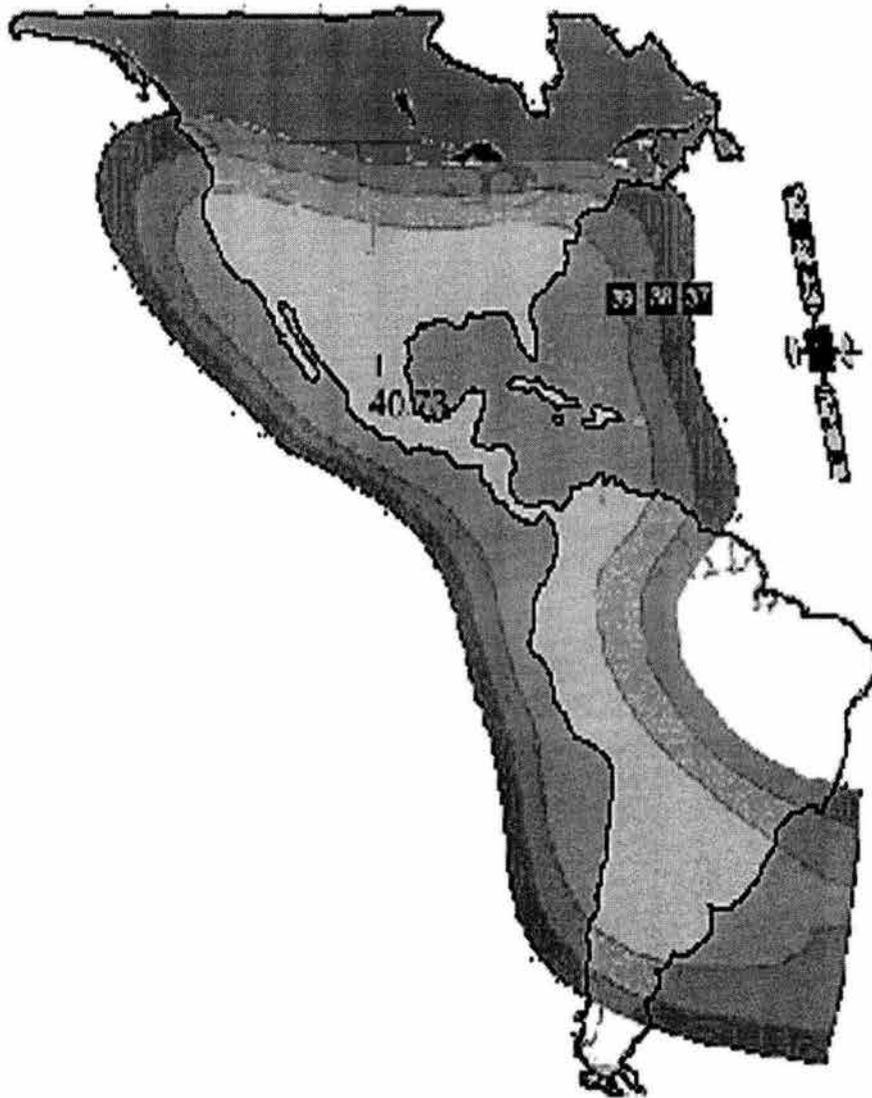
Posteriormente también se presenta las aplicaciones del Satmex 6 y su cobertura en las figuras 3.10 a 3.17.

3.4.1 CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DEL SATMEX V

<p>DATOS GENERALES</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Modelo hs601 hp, de la Hughes Space & Communications, con estabilización triaxial, 7000 watts de potencia y vida estimada de 15 años. ● Celdas solares de arseniuro de galio y propulsión iónica. ● 24 transpondedores (con 30 twtas) para banda c y 24 (con 32 TWTAs) para banda ku, todos de 36 mhz., antenas parabólicas conformadas. ● Lanzado el 5/12/98 mediante un cohete ariane 4 se ubica en 116.8 W e inicio operaciones en enero/2000. 								
	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="393 625 570 709">Internet</td> <td data-bbox="570 625 1276 709">Conecta a los distribuidores del servicio en el primer nivel del backbone de Internet, evitando congestión (300 KHz a 2 Mbs).</td> </tr> <tr> <td data-bbox="393 751 570 890">Radiodifusión</td> <td data-bbox="570 751 1276 890"> <ul style="list-style-type: none"> ● transmisiones analógico/digitales de radio y T.V. ● Servicios Ocasionales Satmex (SOS), reservados hasta con 15 minutos de anticipación para todo tipo de eventos, reservando inclusive a través de Internet. </td> </tr> </table>	Internet	Conecta a los distribuidores del servicio en el primer nivel del backbone de Internet, evitando congestión (300 KHz a 2 Mbs).	Radiodifusión	<ul style="list-style-type: none"> ● transmisiones analógico/digitales de radio y T.V. ● Servicios Ocasionales Satmex (SOS), reservados hasta con 15 minutos de anticipación para todo tipo de eventos, reservando inclusive a través de Internet. 				
Internet	Conecta a los distribuidores del servicio en el primer nivel del backbone de Internet, evitando congestión (300 KHz a 2 Mbs).								
Radiodifusión	<ul style="list-style-type: none"> ● transmisiones analógico/digitales de radio y T.V. ● Servicios Ocasionales Satmex (SOS), reservados hasta con 15 minutos de anticipación para todo tipo de eventos, reservando inclusive a través de Internet. 								
<p>APLICACIONES</p>	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="393 961 570 1079">DTH</td> <td data-bbox="570 961 1276 1079"> <ul style="list-style-type: none"> ● Mediante el estándar internacional DVB o protocolo para transmisión de señales MPEGI, MPEGII y MPEGIII. ● Satmex estima 500 millones de telespectadores de 170 canales de televisión directa al hogar en estos servicios. </td> </tr> </table>	DTH	<ul style="list-style-type: none"> ● Mediante el estándar internacional DVB o protocolo para transmisión de señales MPEGI, MPEGII y MPEGIII. ● Satmex estima 500 millones de telespectadores de 170 canales de televisión directa al hogar en estos servicios. 						
DTH	<ul style="list-style-type: none"> ● Mediante el estándar internacional DVB o protocolo para transmisión de señales MPEGI, MPEGII y MPEGIII. ● Satmex estima 500 millones de telespectadores de 170 canales de televisión directa al hogar en estos servicios. 								
	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="393 1138 570 1247">Educación a distancia</td> <td data-bbox="570 1138 1276 1247"> <ul style="list-style-type: none"> ● El programa de alfabetización EDUSAT opera desde 1994 en todo el país con 21,000 receptores, difundiendo además de clases, videoconferencias (380 Kb) y sesiones de trabajo diversas. </td> </tr> <tr> <td data-bbox="393 1297 570 1415">Redes corporativas</td> <td data-bbox="570 1297 1276 1415"> <ul style="list-style-type: none"> ● Mediastreaming para canales interactivos mediante VSAT's o USAT's entre equipos de trabajo y proveedores. ● Técnicas de acceso SCPC para redes diversas. </td> </tr> <tr> <td data-bbox="393 1465 570 1604">Telefonía rural y de larga distancia</td> <td data-bbox="570 1465 1276 1604"> <ul style="list-style-type: none"> ● enlaza comunidades aisladas. ● permite interconexiones entre proveedores de servicios diversos y enlaces de "última milla". </td> </tr> <tr> <td data-bbox="393 1675 570 1772">Telemedicina</td> <td data-bbox="570 1675 1276 1772"> <p>La red de telemedicina del ISSTE apoya a clínicas, hospitales y centros de salud de 15 localidades, evitando traslados innecesarios pues brinda consulta, diagnóstico, radiología y capacitación a distancia.</p> </td> </tr> </table>	Educación a distancia	<ul style="list-style-type: none"> ● El programa de alfabetización EDUSAT opera desde 1994 en todo el país con 21,000 receptores, difundiendo además de clases, videoconferencias (380 Kb) y sesiones de trabajo diversas. 	Redes corporativas	<ul style="list-style-type: none"> ● Mediastreaming para canales interactivos mediante VSAT's o USAT's entre equipos de trabajo y proveedores. ● Técnicas de acceso SCPC para redes diversas. 	Telefonía rural y de larga distancia	<ul style="list-style-type: none"> ● enlaza comunidades aisladas. ● permite interconexiones entre proveedores de servicios diversos y enlaces de "última milla". 	Telemedicina	<p>La red de telemedicina del ISSTE apoya a clínicas, hospitales y centros de salud de 15 localidades, evitando traslados innecesarios pues brinda consulta, diagnóstico, radiología y capacitación a distancia.</p>
Educación a distancia	<ul style="list-style-type: none"> ● El programa de alfabetización EDUSAT opera desde 1994 en todo el país con 21,000 receptores, difundiendo además de clases, videoconferencias (380 Kb) y sesiones de trabajo diversas. 								
Redes corporativas	<ul style="list-style-type: none"> ● Mediastreaming para canales interactivos mediante VSAT's o USAT's entre equipos de trabajo y proveedores. ● Técnicas de acceso SCPC para redes diversas. 								
Telefonía rural y de larga distancia	<ul style="list-style-type: none"> ● enlaza comunidades aisladas. ● permite interconexiones entre proveedores de servicios diversos y enlaces de "última milla". 								
Telemedicina	<p>La red de telemedicina del ISSTE apoya a clínicas, hospitales y centros de salud de 15 localidades, evitando traslados innecesarios pues brinda consulta, diagnóstico, radiología y capacitación a distancia.</p>								

El satélite es un buen respaldo de las redes terrestres que día con día utilizan en mayor proporción la fibra óptica.

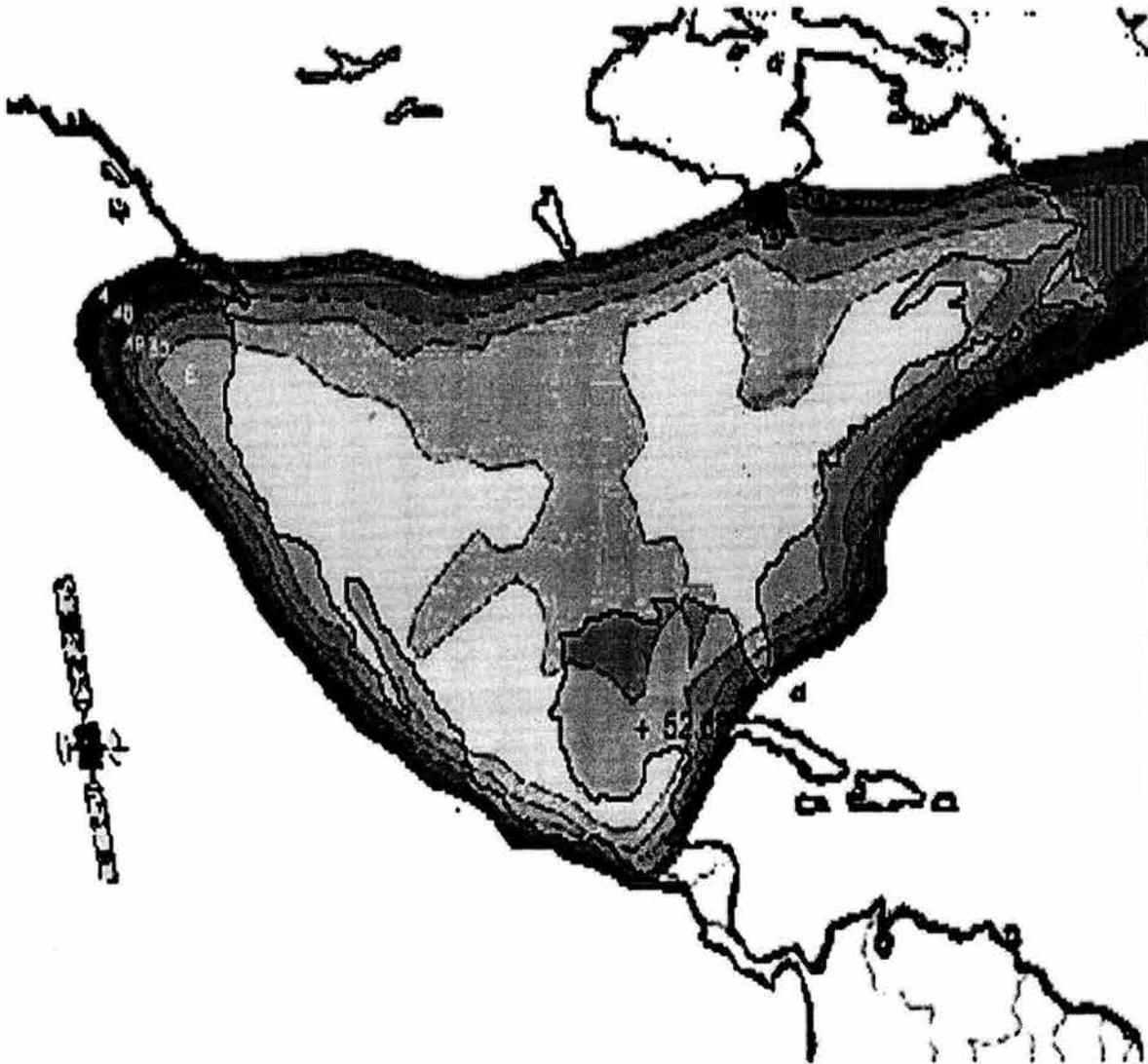
SATMEX 5 BANDA C 116.8 W



COBERTURA INTERCONTINENTAL DEL SATELITE SATMEX5

FIGURA 3.7. COBERTURA DEL SATMEX 5 EN BANDA C

SATMEX5 116.8 W



COBERTURA EN BANDA Ku

FIGURA 3.8 COBERTURA DE SATMEX 5 EN BANDA Ku

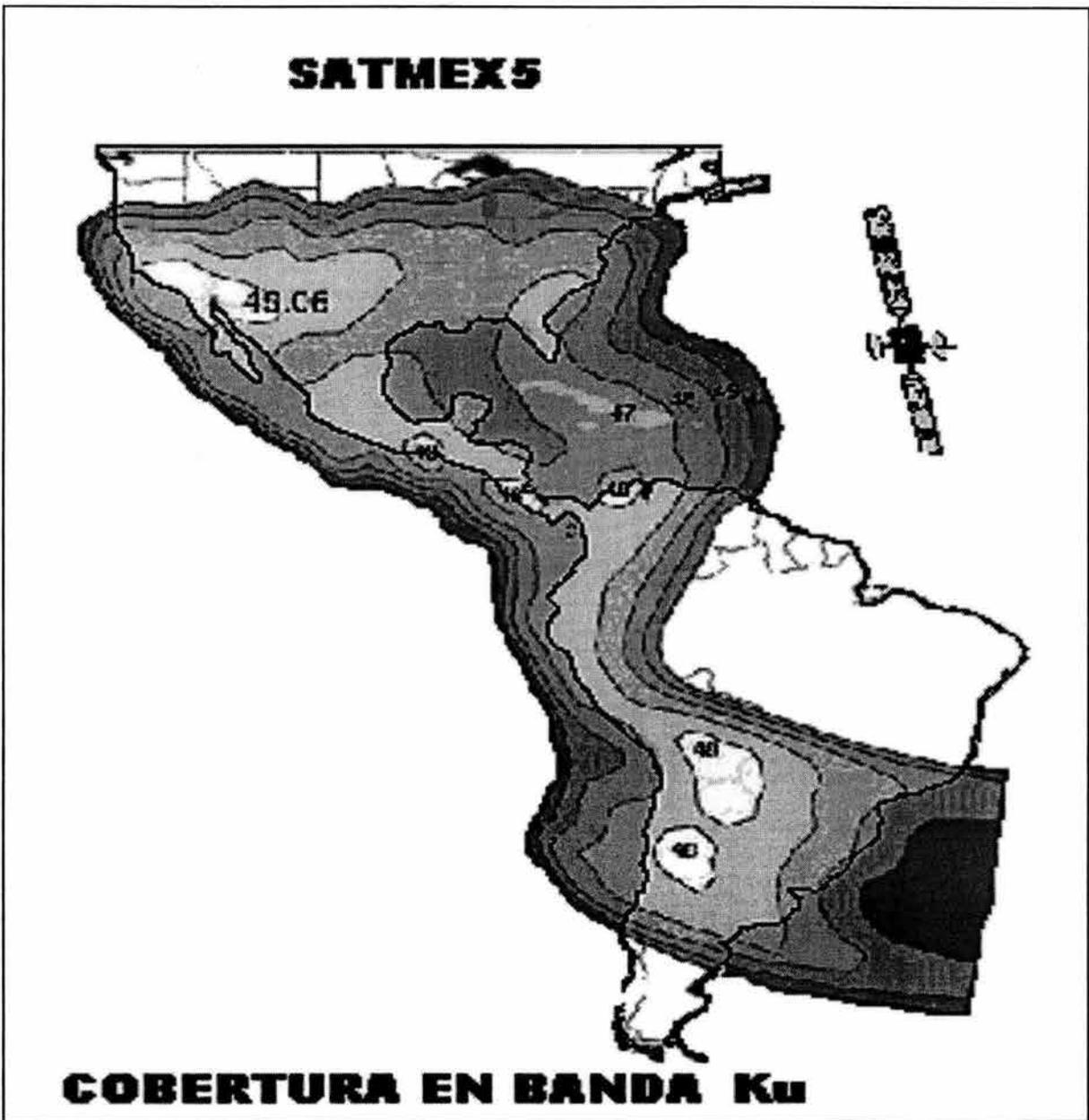


FIGURA 3.9 COBERTURA ADICIONAL DEL SATMEX 5 EN BANDA Ku

3.4.2 CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DEL SATMEX VI

<p>DATOS GENERALES</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Modelo FS-1300X, construido por Space Systems/Loral, con estabilización triaxial, 12000 watts de potencia y vida estimada de 15 años. ● Celdas solares de arseniuro de galio y propulsión iónica. ● 36 transpondedores (con 36 twtas) para banda C, 12 cubriendo Estados Unidos con 40 dBW, 12 cubriendo Sudamérica con 39 dBW y 12 con cobertura Continental con 38 dBW. ● 36 transpondedores (con 36 twtas) para banda Ku, 12 fijos + 6 conmutables para cobertura NAFTA y 6 fijos + 6 conmutables para cobertura Continental, todos de 36 mhz., y la redundancia en cada banda será de 16:12, empleando antenas parabólicas de cobertura configurada (conformadas). ● Se lanzará en 2003 y se ubicará en la posición orbital 109.2 W. 						
	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="396 735 577 892"> <p>Internet de alta velocidad y redes de banda ancha.</p> </td> <td data-bbox="577 735 1279 892"> <p>Apoya la construcción de plataformas de telecomunicaciones para transmisión de grandes volúmenes de información hacia múltiples sitios dispersos geográficamente, incluyendo voz, datos, video e Internet en una sola plataforma.</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="396 892 577 1050"> <p>Internet alta velocidad</p> </td> <td data-bbox="577 892 1279 1050"> <ul style="list-style-type: none"> ● favorece los servicios de conectividad integral al backbone de Internet para evitar congestión en redes terrestres ● Alta confiabilidad y apoyo en caso de desastres. </td> </tr> </table>	<p>Internet de alta velocidad y redes de banda ancha.</p>	<p>Apoya la construcción de plataformas de telecomunicaciones para transmisión de grandes volúmenes de información hacia múltiples sitios dispersos geográficamente, incluyendo voz, datos, video e Internet en una sola plataforma.</p>	<p>Internet alta velocidad</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● favorece los servicios de conectividad integral al backbone de Internet para evitar congestión en redes terrestres ● Alta confiabilidad y apoyo en caso de desastres. 		
<p>Internet de alta velocidad y redes de banda ancha.</p>	<p>Apoya la construcción de plataformas de telecomunicaciones para transmisión de grandes volúmenes de información hacia múltiples sitios dispersos geográficamente, incluyendo voz, datos, video e Internet en una sola plataforma.</p>						
<p>Internet alta velocidad</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● favorece los servicios de conectividad integral al backbone de Internet para evitar congestión en redes terrestres ● Alta confiabilidad y apoyo en caso de desastres. 						
<p>APLICACIONES</p>							
	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="396 1134 577 1207"> <p>Broadcasting</p> </td> <td data-bbox="577 1134 1279 1207"> <ul style="list-style-type: none"> ● Difusión de señales simultáneas en tiempo real o diferido de T.V., radio y noticias en todo el continente americano, empleando bandas C y Ku. </td> </tr> <tr> <td data-bbox="396 1207 577 1354"> <p>Redes privadas VSAT</p> </td> <td data-bbox="577 1207 1279 1354"> <ul style="list-style-type: none"> ● enlaces distantes a bajo costo e instalación sencilla para empresas corporativas nacionales e internacionales desde 2 estaciones. </td> </tr> <tr> <td data-bbox="396 1354 577 1554"> <p>Telefonía rural y de larga distancia</p> </td> <td data-bbox="577 1354 1279 1554"> <ul style="list-style-type: none"> ● enlaza comunidades aisladas. ● enlaces nacionales e internacionales a través de estaciones terrenas. </td> </tr> </table>	<p>Broadcasting</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Difusión de señales simultáneas en tiempo real o diferido de T.V., radio y noticias en todo el continente americano, empleando bandas C y Ku. 	<p>Redes privadas VSAT</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● enlaces distantes a bajo costo e instalación sencilla para empresas corporativas nacionales e internacionales desde 2 estaciones. 	<p>Telefonía rural y de larga distancia</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● enlaza comunidades aisladas. ● enlaces nacionales e internacionales a través de estaciones terrenas.
<p>Broadcasting</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Difusión de señales simultáneas en tiempo real o diferido de T.V., radio y noticias en todo el continente americano, empleando bandas C y Ku. 						
<p>Redes privadas VSAT</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● enlaces distantes a bajo costo e instalación sencilla para empresas corporativas nacionales e internacionales desde 2 estaciones. 						
<p>Telefonía rural y de larga distancia</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● enlaza comunidades aisladas. ● enlaces nacionales e internacionales a través de estaciones terrenas. 						

El satélite es un buen respaldo de las redes terrestres que día con día utilizan en mayor proporción la fibra óptica

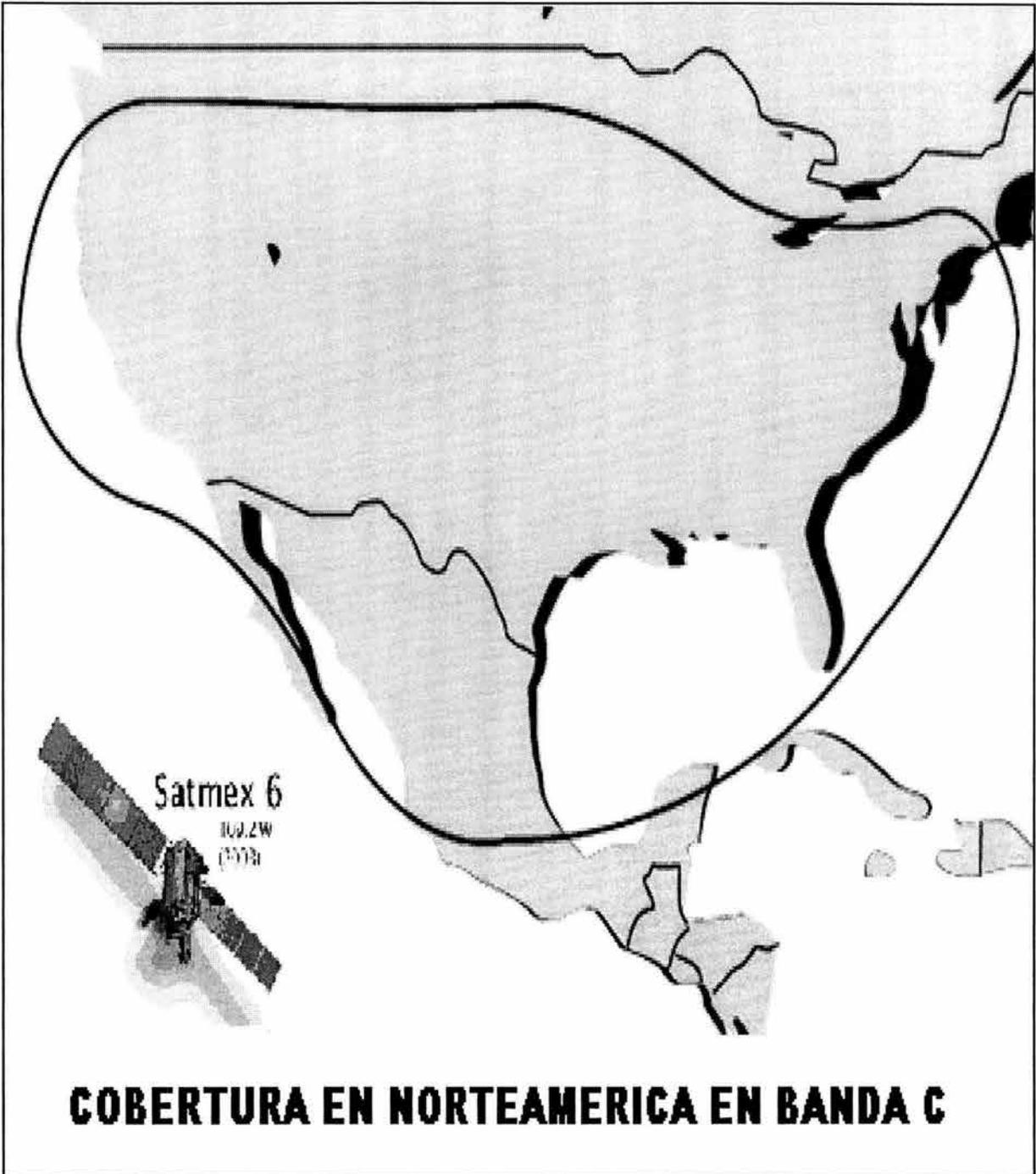


FIGURA 3.10 PRIMER REGION DE COBERTURA EN BANDA C

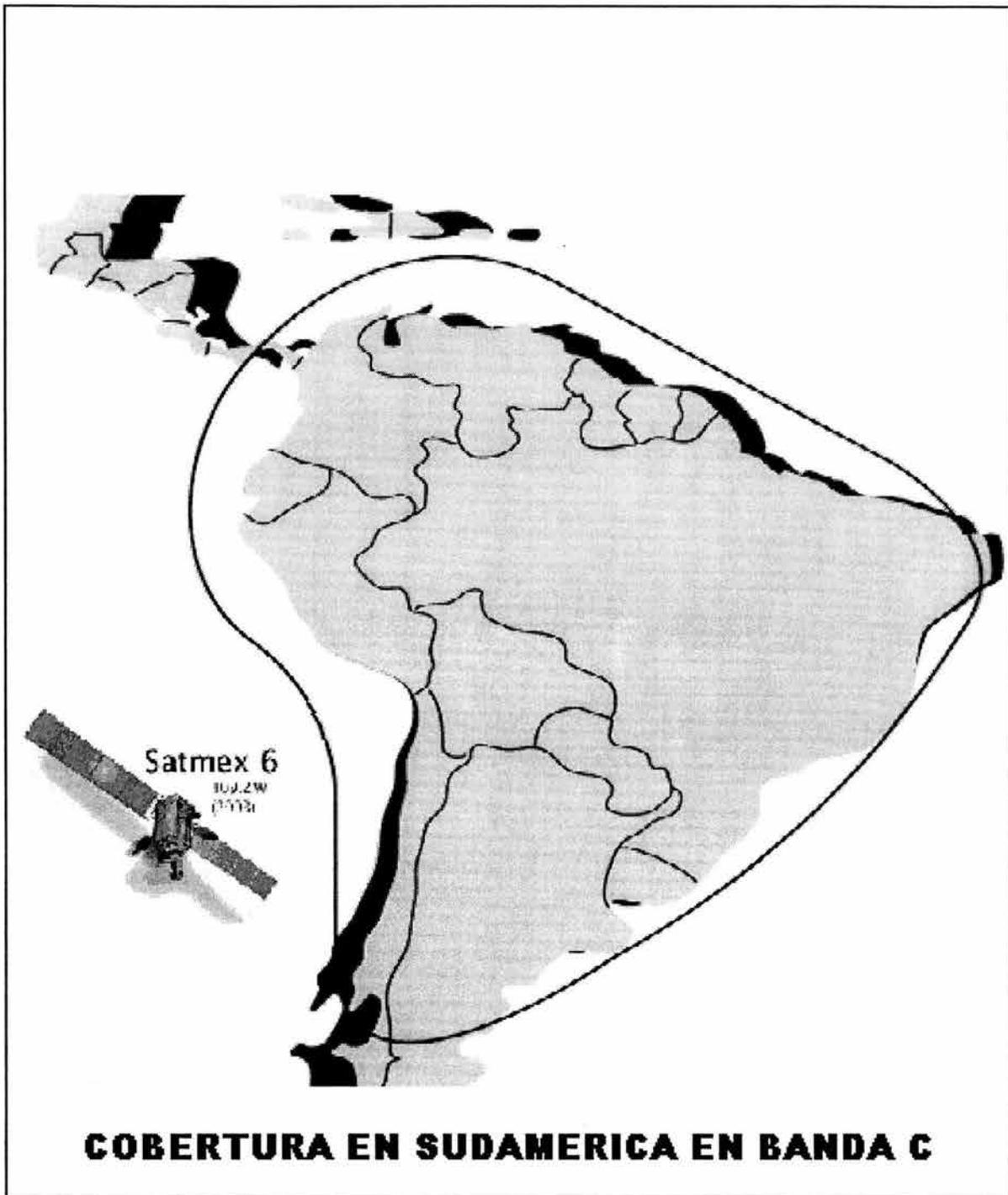


FIGURA 3.11 SEGUNDA REGION DE COBERTURA EN BANDA C

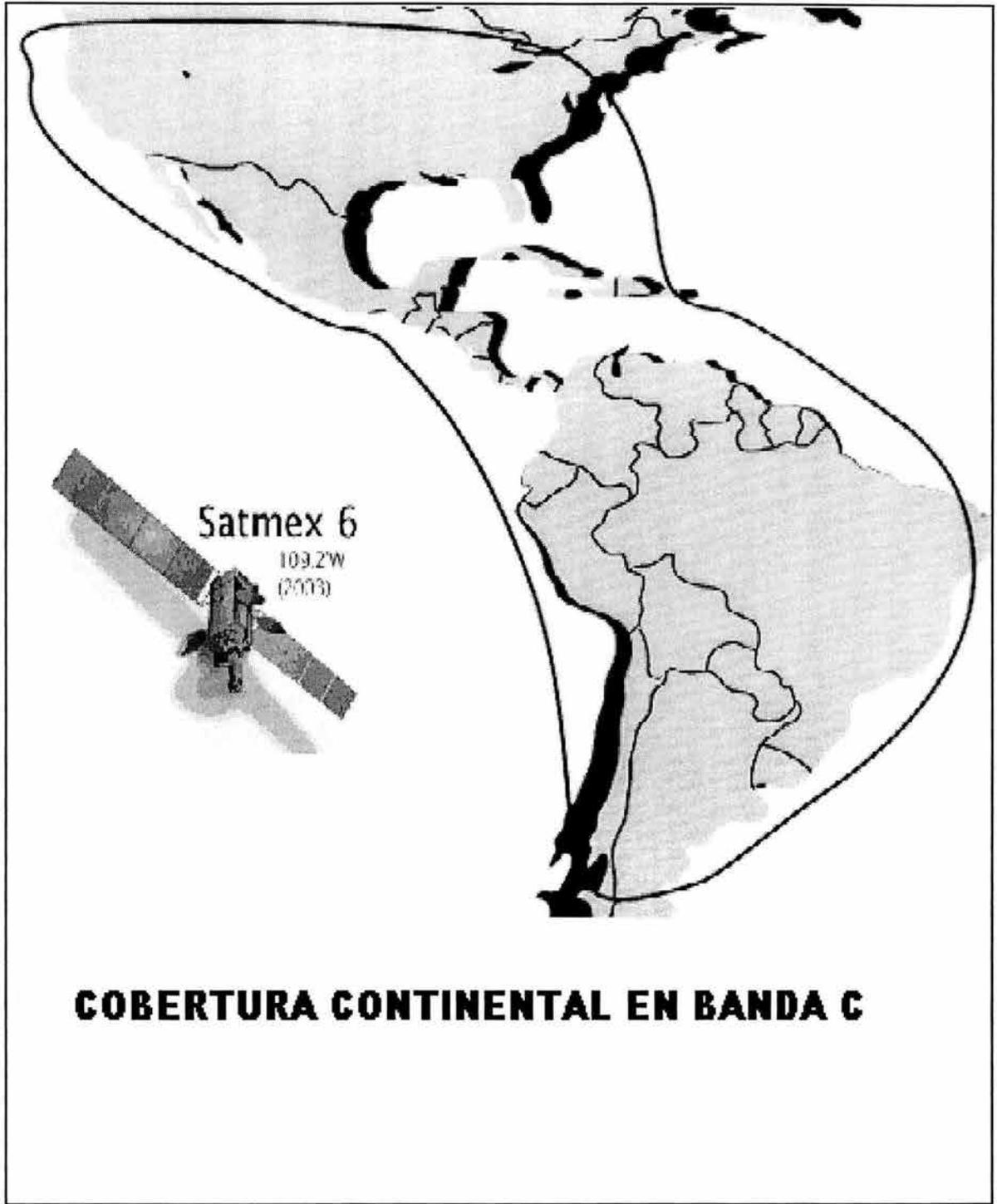


FIGURA 3.12 TERCER REGION DE COBERTURA EN BANDA C

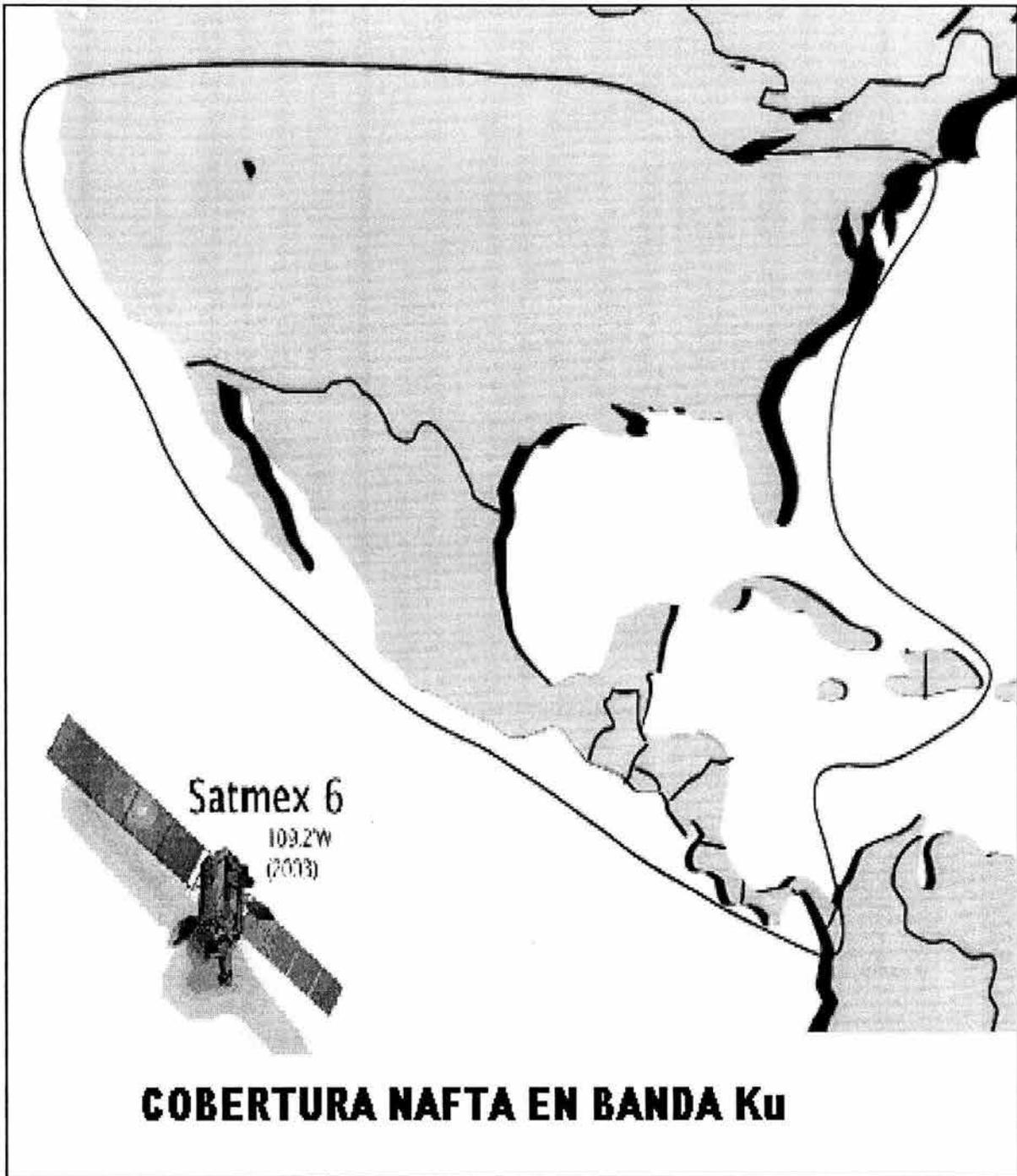


FIGURA 3.13 PRIMER REGION DE COBERTURA EN BANDA Ku

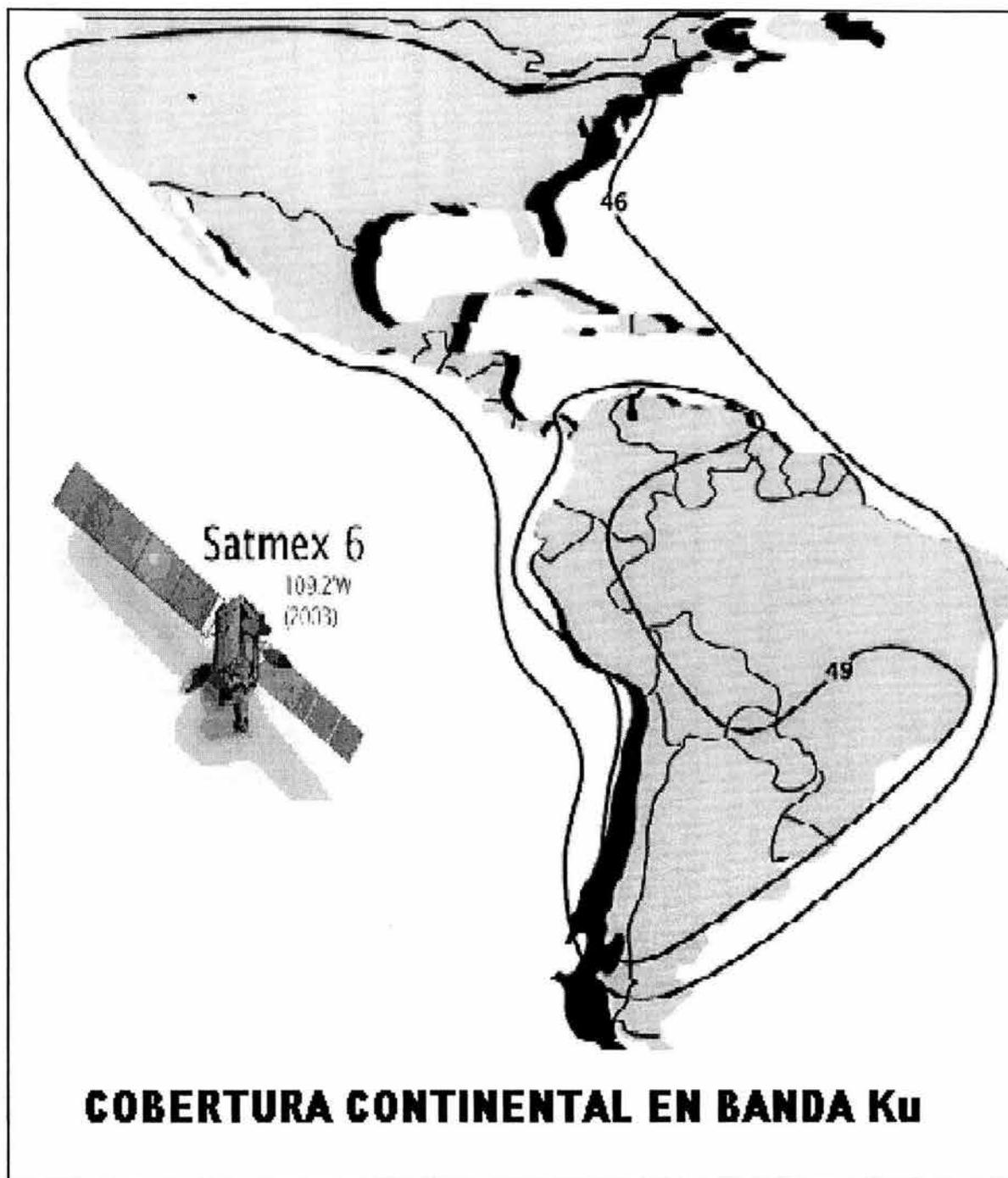


FIGURA 3.14 SEGUNDA REGION DE COBERTURA EN BANDA Ku

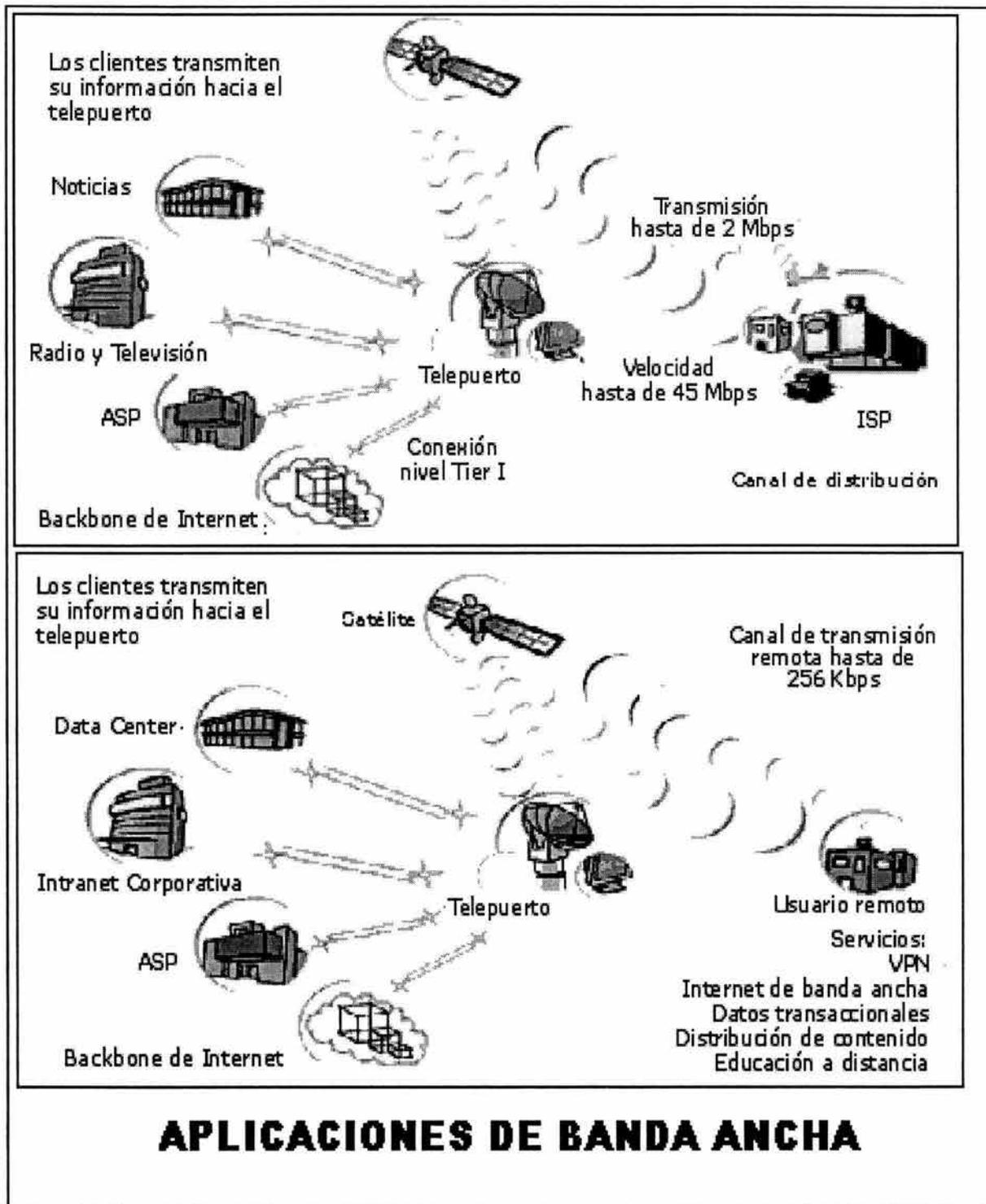


FIGURA 3.15. APLICACIONES DE BANDA ANCHA VIA SATÉLITE DEL SATMEX VI

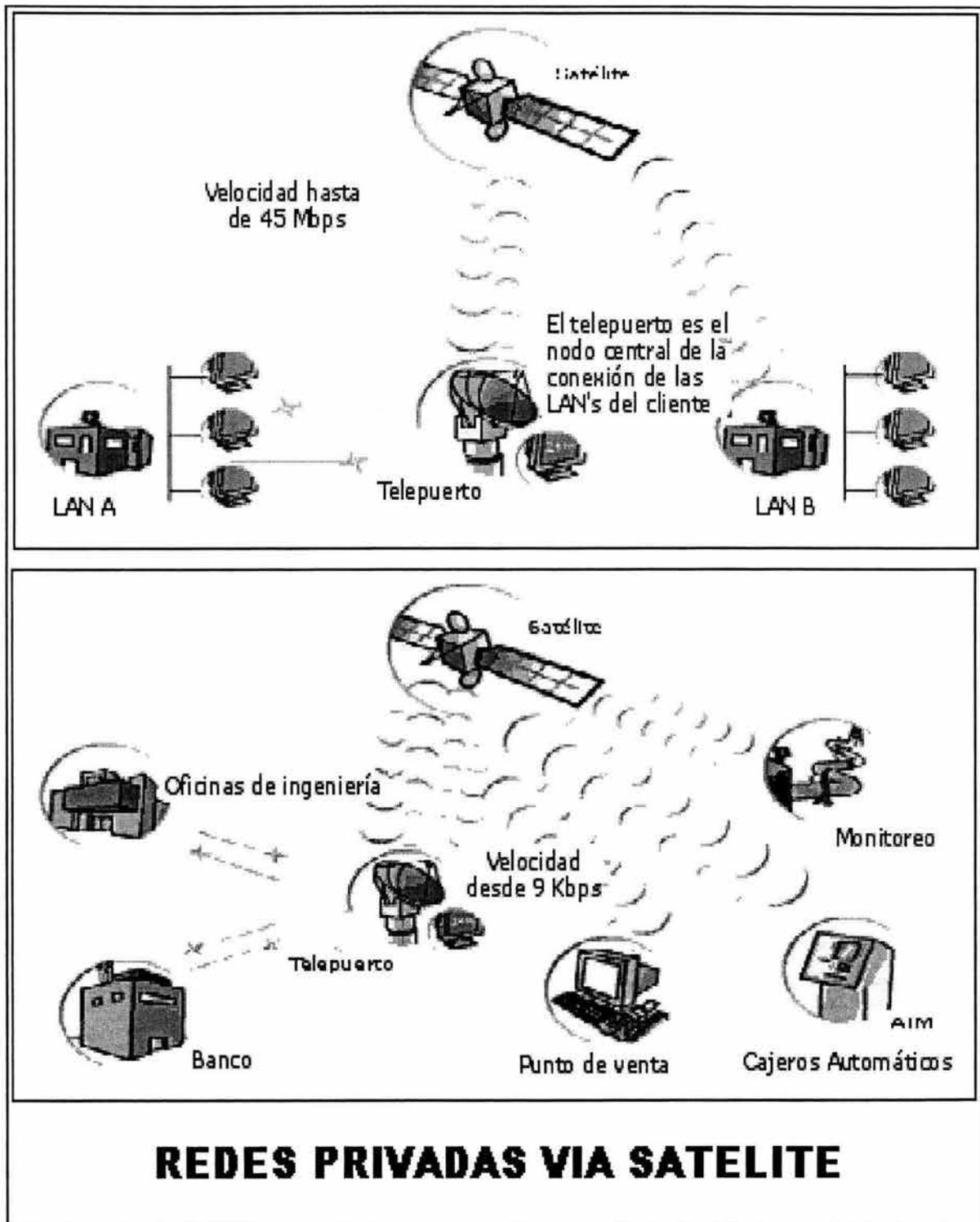


FIGURA 3.16 REDES VIA SATELITE EN SATMEX VI

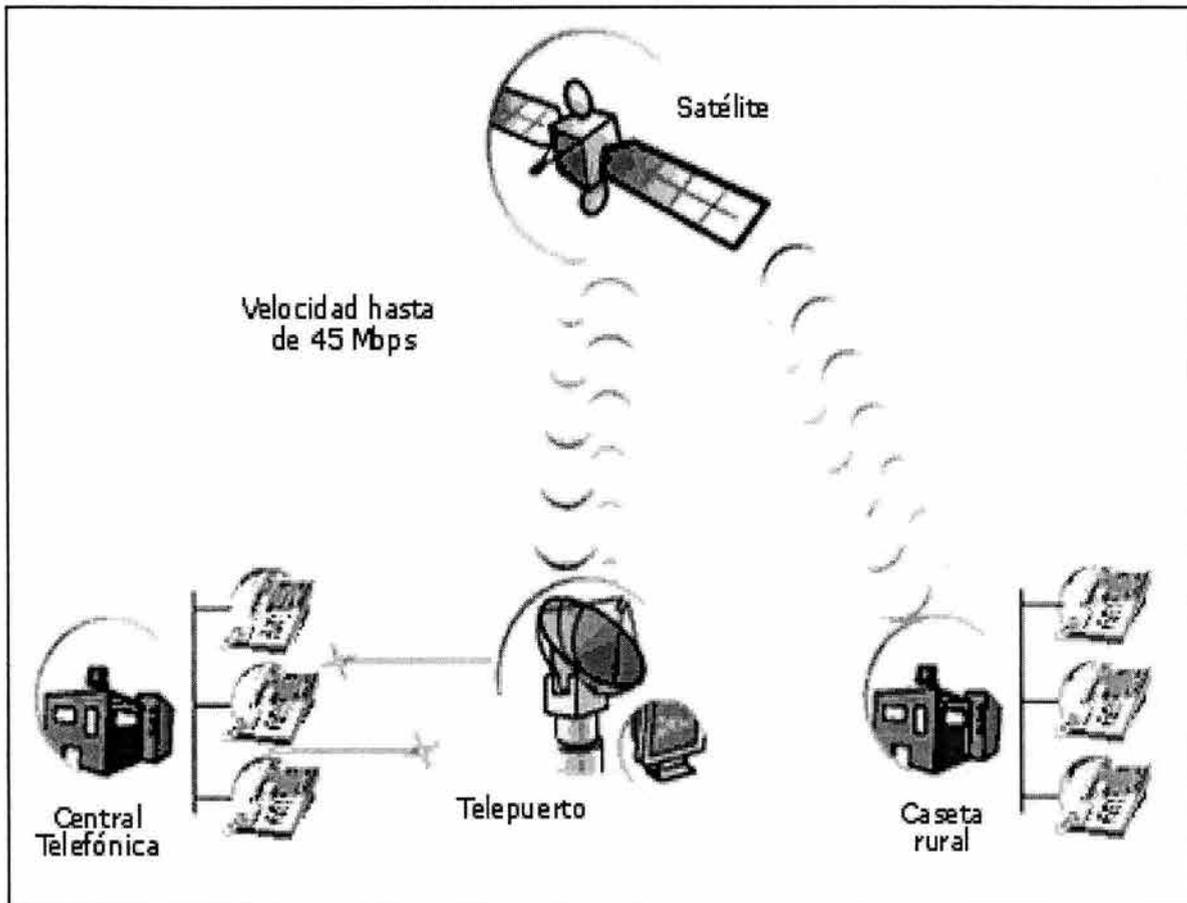


FIGURA 3.17 TELEFONIA RURAL VIA SATÉLITE EN SATMEX VI

CAPITULO 4.0 LA ATMÓSFERA Y SU IMPACTO EN LAS TELECOMUNICACIONES

4.1 DINÁMICA ATMOSFÉRICA

La atmósfera terrestre (o cubierta gaseosa), presenta un comportamiento dinámico cíclico anual con diversos hidrometeoros. A lo largo del año las diferentes temperaturas en la atmosfera ocasionan fenómenos metereológicos de diversas magnitudes. Además dicho oceano atmosférico modifica sus condiciones al aumentar irregularmente su volumen en función de:

- la atracción lunar y solar,
- viento, radiaciones solar y cósmicas que lo impactan y ionizan en sus partes más altas (fig. 4.1), e incluso,
- la presencia y variaciones del campo magnético terrestre, así como la aparición de manchas solares.

Por consiguiente diversos fenómenos atmosféricos impactan las actividades humanas y las telecomunicaciones no guiadas o inalámbricas año con año, pues no es posible determinar el momento de su aparición y su duración.

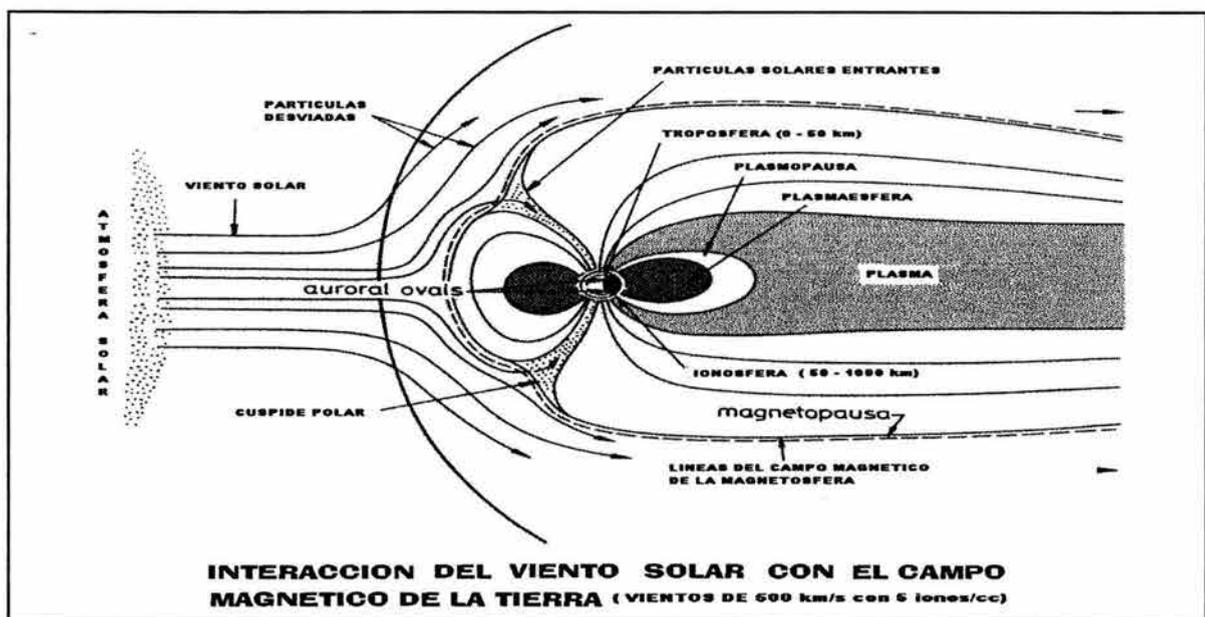


FIGURA 4.1 ACCIÓN DEL VIENTO SOLAR.

De los hidrometeoros que ciclicamente ocurren y afectan a las señales no guiadas, la lluvia es la principal causante de problemas para las telecomunicaciones inalámbricas, pues afecta a los enlaces satelitales (en especial para bandas Ku y superiores), causándoles:

- atenuación de las señales,
- incremento de la temperatura de ruido de las antenas y en cierta medida,
- despolarización de las ondas electromagnéticas.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LAS CAPAS DE LA ATMÓSFERA

El manto gaseoso o atmósfera se puede clasificar en una serie de cinco capas con espesores promedio estimados pues las características particulares que las identifican, también se expanden a lo largo del día (figura 4.2). En la primera de estas capas es donde se generan los diversos hidrometeoros de las distintas regiones del mundo; la clasificación de las capas atmosféricas, a partir de la biosfera, es la siguiente:

- 1) troposfera,
- 2) estratosfera,
- 3) mesosfera,
- 4) ionosfera y la parte final de la atmósfera denominada
- 5) exosfera.

De particular importancia por sus efectos en las telecomunicaciones destaca el comportamiento de la troposfera y de la ionósfera.

La tropósfera es la capa más densa que contiene la mayor parte del aire y casi toda la humedad atmosférica. Debido a los cambios de temperatura y a fenómenos diversos, se encuentra en continua agitación, con fuertes vientos con corrientes de convección y conducción que determinan la meteorología de las distintas regiones, es decir, la cantidad de lluvia, huracanes, nubosidad, etc. Esta es la capa con mayor influencia en las telecomunicaciones. El final de la troposfera se puede reclasificar, sin embargo para el objetivo de este trabajo no es necesario mayor detalle.

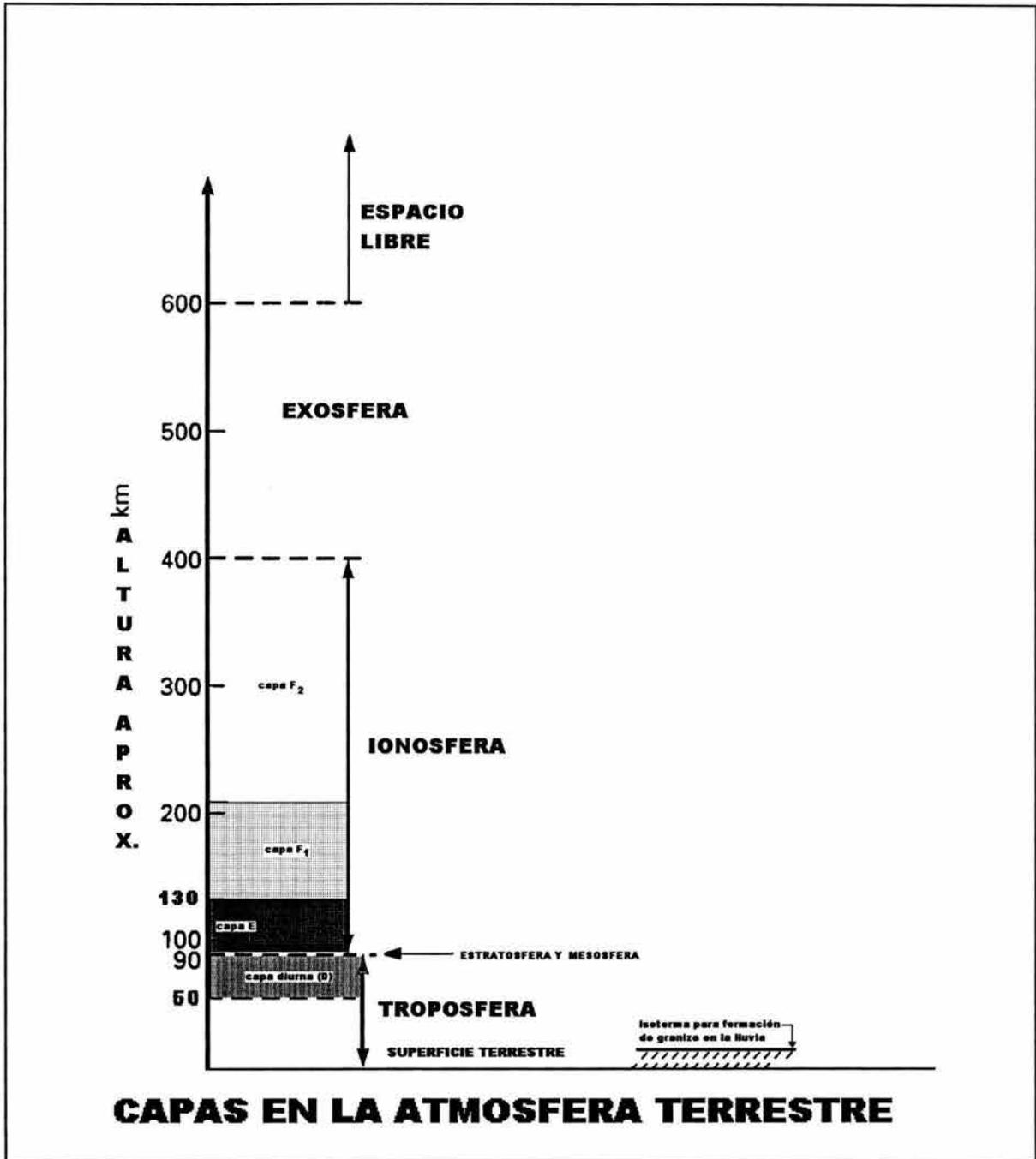


FIGURA 4.2 CAPAS ATMOSFÉRICAS

La estratosfera es una capa relativamente estable, al final de ella se forma la capa de ozono que es una forma alotrópica de oxígeno, cuyas moléculas se separan cuando la luz ultravioleta se impacta con ella.

A continuación la mesósfera, que puede considerarse simplemente como la capa superior de la estratosfera y no es importante para las telecomunicaciones.

La siguiente capa o ionosfera presenta una presión de alrededor de una millonésima comparada con la presión en la superficie de la tierra. Los gases existentes en ella están sometidos a una intensa actividad de rayos X y rayos ultravioleta que, al calentar a los átomos y moléculas gaseosas, los desintegran en gran cantidad desprendiendo partículas atómicas, cargadas eléctricamente o iones. Las moléculas en la ionósfera son susceptibles a ser ionizadas, con variaciones continuas en función de su altura y de la intensidad de la radiación solar en la banda de los rayos X y ultravioletas, así como por la incidencia de protones y electrones libres de origen solar y los rayos cósmicos e intergalácticos. De esta manera la densidad de ionización resulta del equilibrio dinámico de la ionización y deionización que se produce por la colisión entre iones.

La concentración de electrones con carga negativa alcanza los 15 millones por pulgada cúbica. Esta capa de iones se comporta como un espejo para ciertas bandas de radiofrecuencia, pues facilita las comunicaciones a grandes distancias en función de la altura a la que se encuentre.

4.2.1 TELECOMUNICACIONES A TRAVÉS DE LA TROPOSFERA Y IONOSFERA

Dependiendo de la frecuencia con que se transmiten las comunicaciones inalámbricas, aparecen varios fenómenos, a saber:

- onda de superficie (mostrada en la fig. 4.4 y que afecta principalmente a frecuencias inferiores a la banda MF);

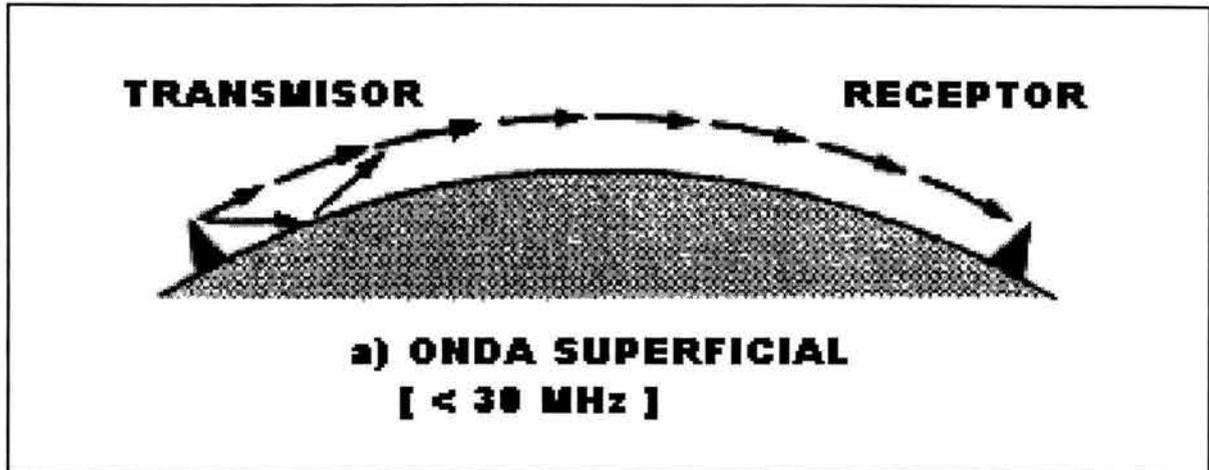


Fig. 4.4 trayectoria de las señales con longitud de onda < 100 m. (Radio en onda larga (básicamente AM, radio transoceánico, etc.)

- la reflexión ionosférica mostrada en la fig. 4.5, que se presenta a partir de las frecuencias HF modificando su alcance; La capa D de la ionósfera es diurna y desaparece en la noche, en consecuencia hay menor alcance en el día con relación a la noche para la onda corta.

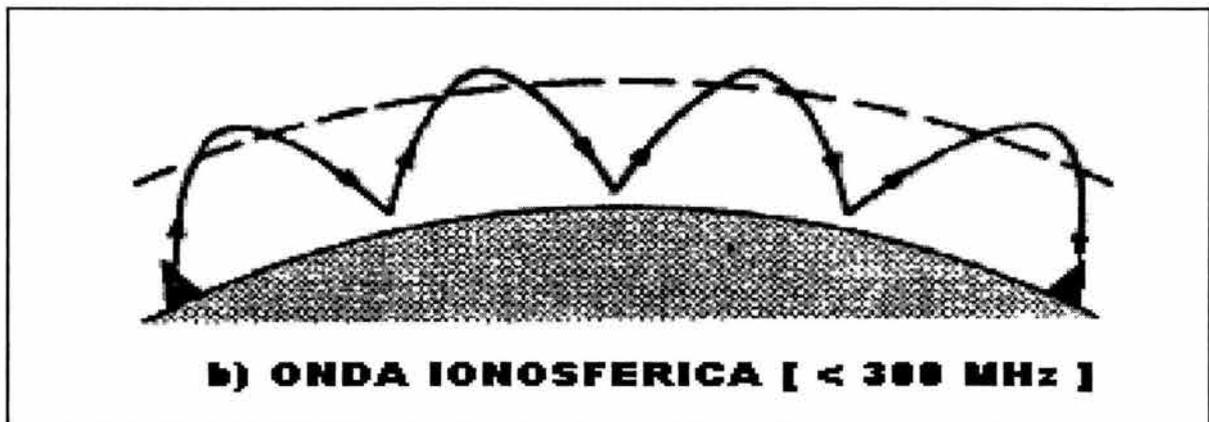


Fig. 4.5 rebotes ionósfera- tierra de señales con longitud de onda menores de 100 m y mayores de 10 m. (parte de radio en onda corta).

- la difracción mostrada en la fig. 4.6, que permite comunicación sin que haya línea de vista entre dos puntos (frecuencias inferiores a UHF). Aunque en ocasiones la presencia de obstáculos en la línea de vista entre el transmisor y receptor de microondas y frecuencias superiores, impide o dificulta las comunicaciones.

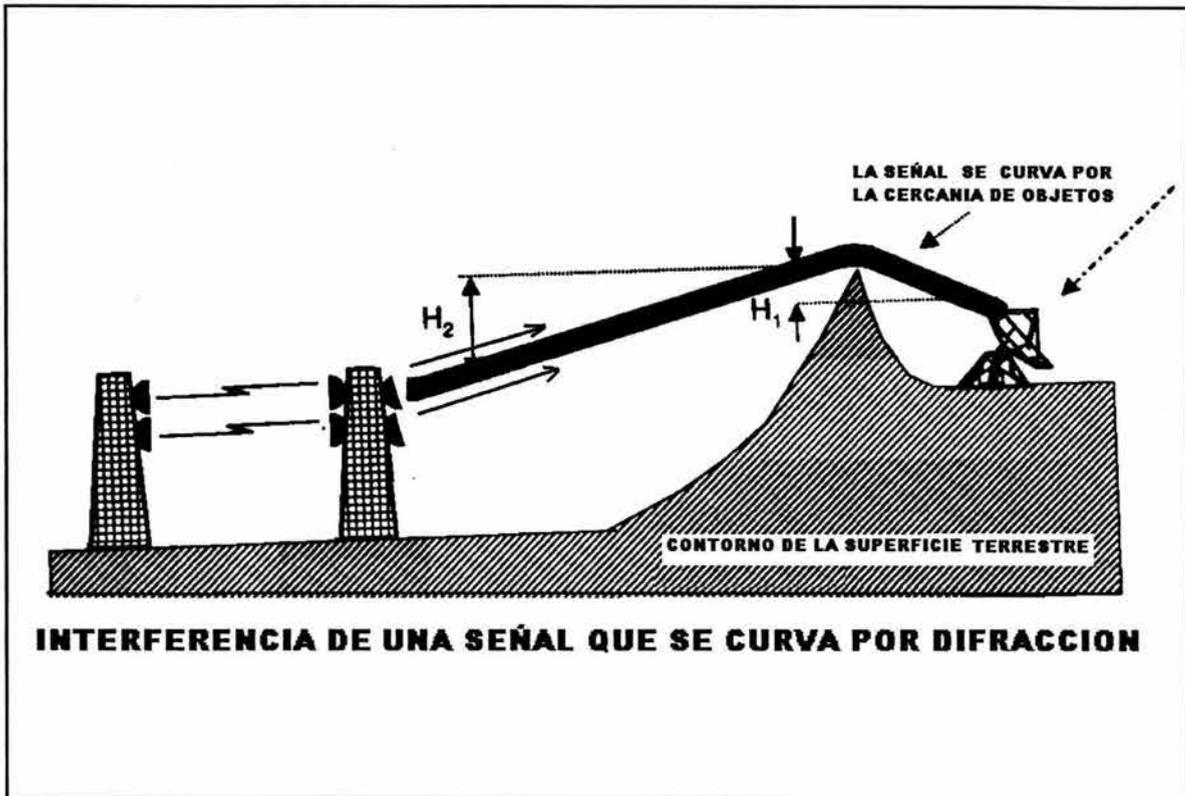


Fig. 4.6 comunicaciones e interferencia sin línea de vista.

Las condiciones troposféricas son importantes para las bandas VHF y UHF en los que la longitud de onda es comparable con las "no homogeneidades" del índice de refracción de la atmósfera (que depende de la temperatura, presión y humedad), pues en este caso permite alcances de centenares de kilómetros pero, en ocasiones, con desvanecimientos pues el cambio del índice de refracción atmosférico causa multitrayectorias con dispersión de la señal (ver fig. 4.7).

Para las comunicaciones inalámbricas es de crucial importancia el contenido de vapor, gases diversos y temperatura en la atmósfera, además de los hidrometeoros que ocurren, pues todo ello genera factores de diversa importancia para el cálculo de la atenuación de las ondas electromagnéticas, en particular en frecuencias arriba de 10 GHz.

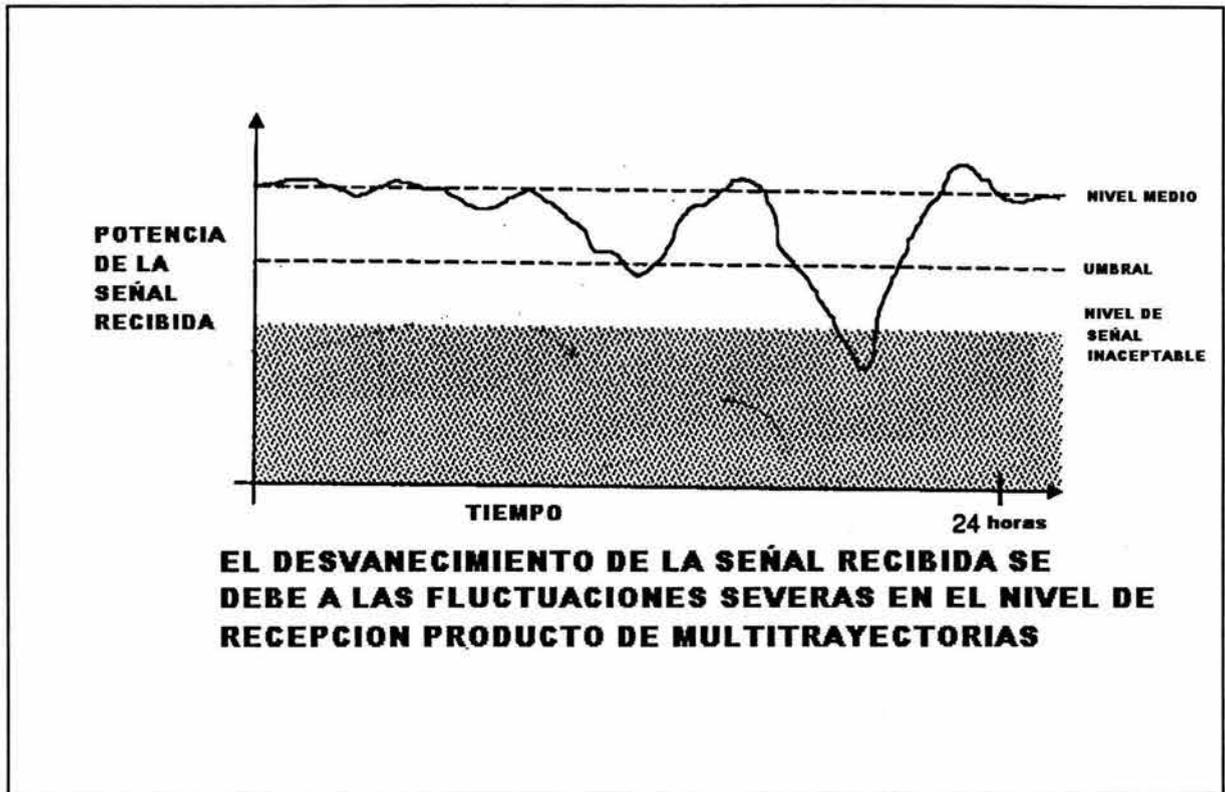


FIGURA 4.7 GRÁFICA DE DESVANECIMIENTO POR MULTITRAYECTORIAS.

4.2.1.1 IMPORTANCIA DE LA IONÓSFERA EN LAS TELECOMUNICACIONES

En 1902 Marconi descubrió que la radiocomunicación telegráfica alcanzaba mayores distancias durante la noche que en el día. En ese mismo año y de forma independiente, Kenelly y Heaviside postularon la existencia de una capa ionizada como responsable de la reflexión de las ondas electromagnéticas; en 1925 en Londres, Appleton y Barnett determinaron su altura y la llamaron capa E o capa eléctrica, posteriormente se clasificó una capa superior F (desdoblable en ocasiones en F_1 y F_2) y se consideró la inferior o D (ver fig. 4.8).

La capa D va de los 50 a los 90 km de altura; su densidad de ionización es creciente con la altura y varía grandemente en el transcurso del día hasta prácticamente desaparecer en la noche, considerándosele como una capa diurna.

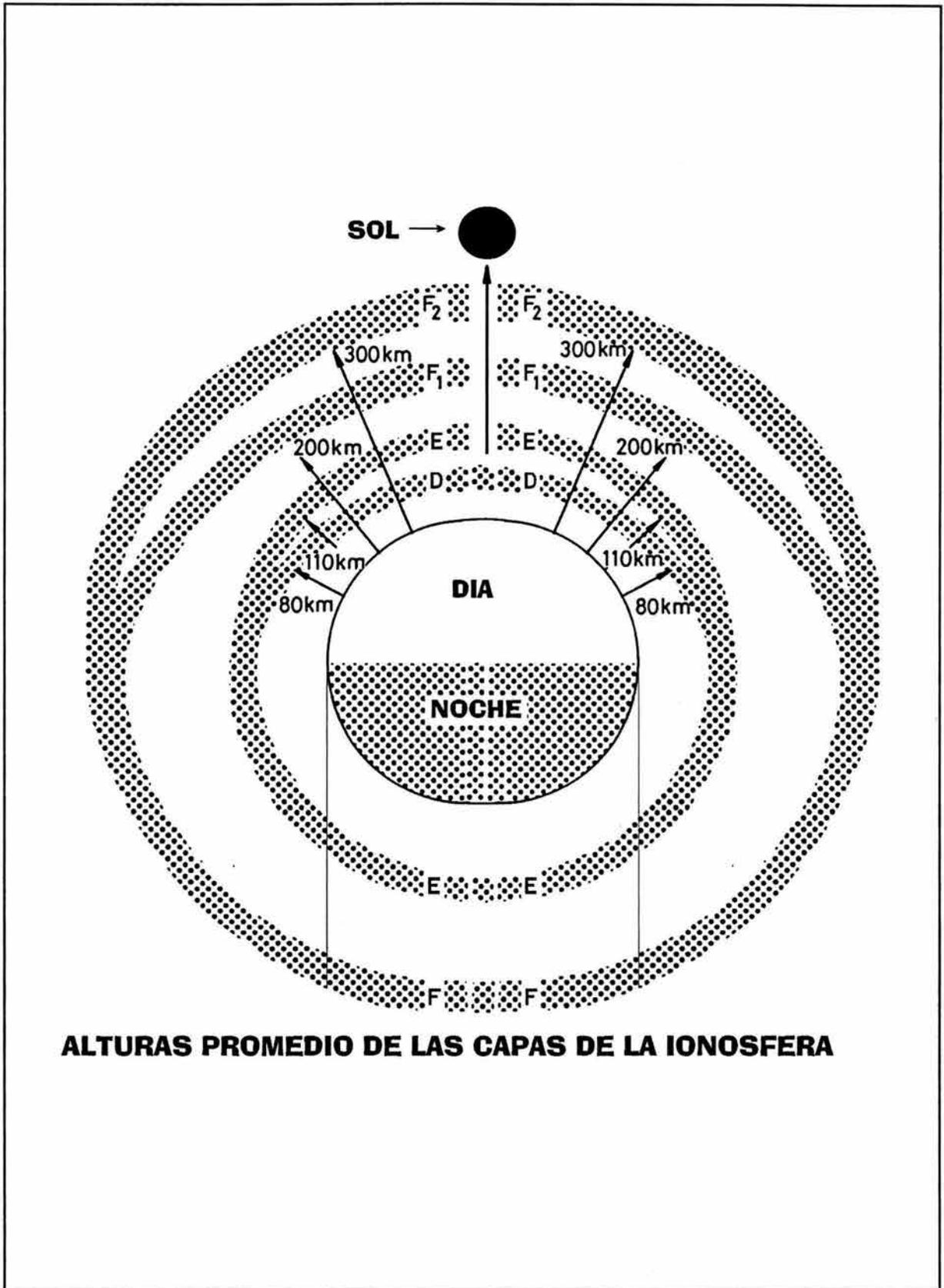
La capa E que va de los 90 a los 130 km de altura presenta grandes variaciones de ionización, resulta estable durante la noche y su comportamiento está en función de los ciclos solares. Su máximo de ionización se encuentra alrededor de 10^{11} *electrones/m³* , durante el verano con zonas anómalas de ionización que dan lugar en ocasiones a una capa E_s .

La capa F se ubica arriba de los 130 km de altura; la primera parte, de los 130 a los 210 km se conoce como capa F_1 y aparece únicamente durante el día; de los 210 km en adelante se denomina capa F_2 y sus niveles de ionización se mantienen constantes todo el día. El grosor promedio estimado para la ionósfera es alrededor de 350 km.

Como la densidad de ionización depende principalmente de la actividad solar, se explica el comportamiento cíclico de la ionósfera con su variación regular por el cambio de densidad molecular entre el día y la noche, además de cambios cíclicos fuertes cada 11 años, que coinciden con el ciclo de aparición de las llamaradas y manchas solares con viento solar altamente ionizado a más de 50,000 km/seg.

Para las frecuencias superiores a 30 MHz, la ionósfera es prácticamente transparente y únicamente tiene efectos esporádicos a causa de la capa E. Para esas frecuencias aparecen los fenómenos de cintilación y rotación de Faraday principalmente.

Es obvio que la naturaleza cíclica de los cambios a lo largo del tiempo, permite aplicar la estadística y probabilidad para prever la futura magnitud y presencia de los hidrometeoros que afectan las actividades humanas y, en particular, a las telecomunicaciones.



ALTURAS PROMEDIO DE LAS CAPAS DE LA IONOSFERA

FIGURA 4.8 VARIACIÓN DE LAS IONÓSFERA DURANTE EL DIA.

4.3 FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS QUE AFECTAN LAS SEÑALES

Absorción, despolarización y rotación de Faraday

La absorción de la energía de la señal se debe a elementos encontrados en la trayectoria (moléculas gaseosas principalmente), como resultado se tiene una reducción de la amplitud (es una clase de atenuación). La atenuación por absorción se incrementa con la frecuencia; también depende de la temperatura, presión y humedad. La despolarización se debe a la presencia de turbulencias atmosféricas, lluvia y granizo principalmente. La rotación de Faraday obedece a la diferencia entre las constantes de propagación de las componentes de la onda electromagnética, ocasionadas por la ionosfera.

Atenuación con la distancia y por hidrometeoros

La atenuación con la distancia es la disminución progresiva de la potencia con la distancia vista como reducción de la amplitud de la señal pues la señal no se difunde en una sola dirección. De la atenuación producida por hidrometeoros destaca en especial la producida por la lluvia para el caso de los enlaces satelitales a partir de la banda Ku.

Difracción y Refracción

La difracción es un cambio en la dirección de propagación por la presencia de obstáculos o aperturas reducidas en el medio.

La refracción es un cambio en la dirección de propagación por variaciones del índice de refracción del medio. Estos dos fenómenos afectan amplitud, fase, polarización, ancho de banda y el ángulo con que llega la señal.

Dispersión de la frecuencia

Es un cambio en los componentes frecuenciales y de fase en el ancho de banda de una señal debido a un medio dispersivo cuyos elementos constitutivos (permitividad, permeabilidad y conductividad), dependen de la frecuencia (dispersión temporal) o de la dirección de la onda (dispersión espacial).

Scattering y multitrayectoria

El Scattering es la dispersión de la señal debida a la interacción con no homogeneidades del medio. La multitrayectoria es el resultado de irregularidades del índice de refracción en la troposfera o en la ionosfera o por dispersión estructural sobre la superficie terrestre. Estos dos fenómenos afectan amplitud, fase, polarización, ancho de banda y el ángulo de arribo de la señal. La refracción depende de la temperatura, presión y cantidad de vapor; afecta a frecuencias menores de 3 GHz con ángulos bajos (5 a 10°).

Cintilación, desvanecimiento y ruido en la recepción

Las cintilaciones son fluctuaciones rápidas en la amplitud y fase de la señal como resultado de irregularidades a pequeña escala en la trayectoria o trayectorias de transmisión. La cintilación y desvanecimientos por multitrayectoria afecta en las comunicaciones tierra-aire de bajo ángulo y satelitales móviles en VHF. El desvanecimiento es una variación lenta de la amplitud de la señal (del orden de segundos o minutos).

El ruido en la recepción depende de fuentes externas e internas.

4.3.1 PARÁMETROS DE LA SEÑAL Y FENÓMENOS QUE LOS AFECTAN

ángulo de arribo de la señal	difracción	amplitud	absorción
	multitrayectoria		cintilación
	refracción		desvanecimiento
	scattering		difracción
frecuencia	la dispersión	polarización	multitrayectoria
			refracción
fase	cintilación		Como se observa los parámetros de una señal pueden afectarse por fenómenos combinados diversos, con excepción de la frecuencia que únicamente es afectada por la dispersión. Curiosamente la amplitud es afectada por todos los fenómenos con excepción de la dispersión.
	difracción		
	refracción		
	scattering		
ancho de banda de la señal	difracción		absorción
	dispersión		multitrayectoria
	multitrayectoria		refracción
	refracción		scattering
	scattering		

Aunado a toda esta fenomenología se presenta el ruido con su naturaleza aleatoria en todas las frecuencias. De particular importancia cuando su potencia se equipara con la débil señal que se recibe, por ejemplo específico: en las transmisiones desde el espacio exterior que realizan las sondas espaciales (la potencia de la señal recibida es del orden de picowatts).

4.3.2 CAPAS ATMOSFÉRICAS QUE IMPACTAN A LAS MICROONDAS Y PRINCIPALES PROBLEMAS GENERADOS

TROPOSFERA	ATENUACIÓN:	Por lluvia, cristales de hielo, granizo y nieve, gases, nubes, niebla, así como por contaminantes atmosféricos suspendidos. Esta atenuación crece a partir de las EHF y la lluvia la incrementa enormemente a partir de la banda Ka. La absorción por gases atmosféricos de la señal siempre está presente.
	DESPOLARIZACIÓN:	Producida principalmente por la lluvia, y en segundo lugar por el granizo y cristales de hielo. Afecta más al disminuir la frecuencia de las microondas y en particular, más a las polarizaciones horizontales, que a las verticales, causándoles interferencias a las señales ortogonales que se transmiten.
	MULTI-TRAYECTORIAS, CINTILACIÓN Y REFRACCIÓN :	El movimiento aleatorio de los componentes atmosféricos (gases, humedad, viento, etc.), ocasiona cambios en el índice de refracción y, en consecuencia aparecen multitrayectorias para la señal, todo ello en función del medio ambiente y del tamaño y ángulo de elevación de las antenas. Este fenómeno es particularmente significativo a partir de la banda Ka. La señal que arriba puede presentar cambios de amplitud, fase y ángulo de llegada. Para los enlaces satelitales en México no es importante la cintilación ni la multitrayectoria, pues los ángulos de elevación no son menores de 20°. La refracción produce desvanecimientos al aparentar una posición más alta del satélite, sin embargo este fenómeno no es importante.
	DE LOS FENÓMENOS ANTERIORES, SÓLO LA ATENUACIÓN Y DESPOLARIZACIÓN POR LLUVIA SON IMPORTANTES PARA LA MAYOR PARTE DE ENLACES.	
IONÓSFERA	DESPOLARIZACIÓN	Principalmente se debe a la interacción de la señal con las partículas ionizadas y el campo magnético de la tierra. Como consecuencia aparece la rotación de Faraday que aumenta conforme aumenta la ionización, es decir, depende mucho de la actividad solar, siendo mayor durante el día. En esta capa la cintilación disminuye aproximadamente con el cuadrado de la frecuencia, es decir afecta principalmente a frecuencias inferiores a la banda C y es de poca importancia para bandas Ku y superiores.
	REFLEXIÓN Y DIFRACCIÓN	La reflexión ocurre con señales de onda corta y HF, con las microondas solo causa un ligero curvamiento de la señal conocido como difracción y este disminuye al aumentar la frecuencia.

4.4 ATENUACIÓN EN SEÑALES SATELITALES

Como ya se comentó previamente, de entre todos los fenómenos atmosféricos, los más importantes para las comunicaciones vía satélite son la atenuación por lluvia y la despolarización, los demás factores atmosféricos tienen mayor o menor importancia sólo en casos específicos como pueden ser en estaciones con ángulos de inclinación muy bajos, frecuencias de resonancia de moléculas de agua y oxígeno, etc.

4.4.1 ATENUACIÓN POR ABSORCIÓN

Las moléculas de oxígeno y el vapor de agua presentes en la atmósfera ocasionan atenuación por absorción molecular, misma que se incrementa a partir de los 10 GHz, afectando las bandas Ku, Ka, y frecuencias ópticas. Para algunas regiones tropicales se considera incluso la cantidad o concentración de vapor.

La primera región de atenuación está a 22.3 GHz pues coincide con la frecuencia de resonancia de las moléculas del vapor de agua y atenúa parte de la banda K. En los 60 GHz hay otra región de atenuación por la presencia del oxígeno molecular (15 dB/km en nivel del mar). Al aumentar la frecuencia el vapor de agua (nubes y neblina) atenúa fuertemente las frecuencias correspondientes al infrarrojo y a la luz visible, según se muestra en la figura 4.8:

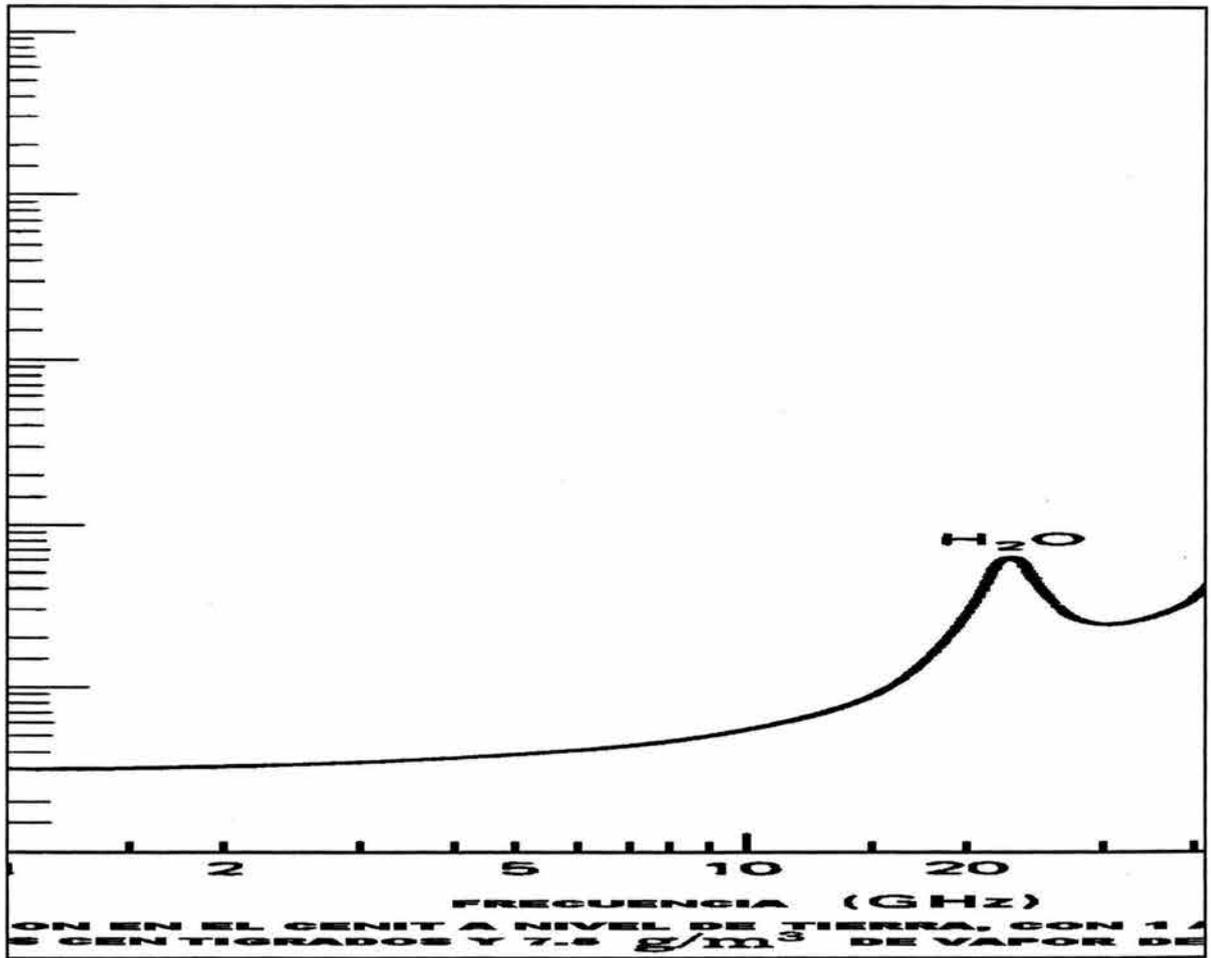


FIGURA 4.8 ATENUACIÓN EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA.

4.4.2 ATENUACIÓN POR HIDROMETEOROS Y LLUVIA

Por otro lado la neblina, nieve y granizo, causan ligera atenuación en la banda SHF e inferiores. La lluvia causa atenuación en frecuencias superiores a 1 GHz, la atenuación total está dada por el producto de la atenuación específica y la altura estimada de la lluvia. La atenuación específica se calcula con la fórmula:

$$Y_R = K R^\alpha$$

R = intensidad de la lluvia en mm/h

K y α dependen de la frecuencia y la polarización de la onda

En la fórmula se considera que las gotas son esferoides:

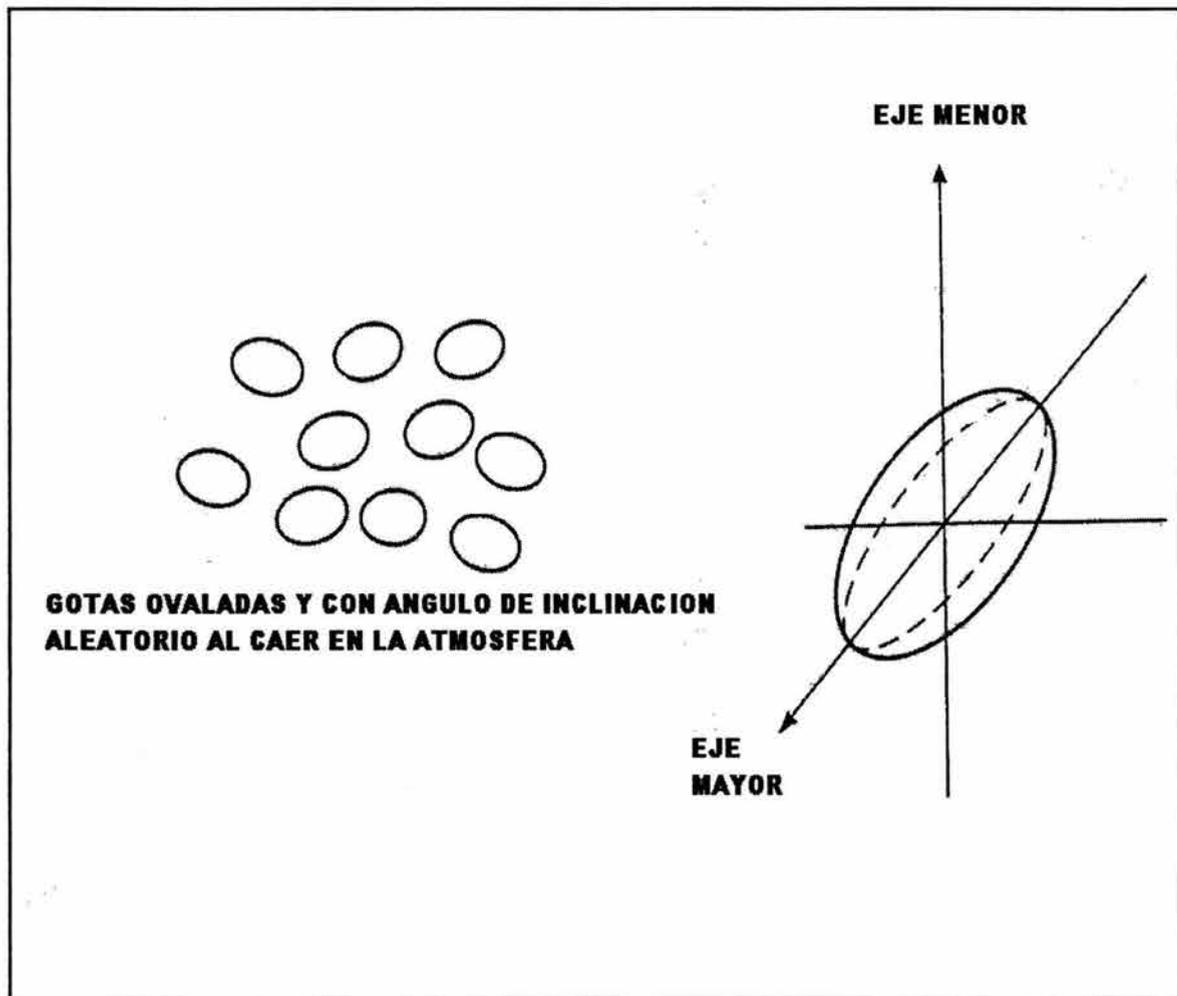


FIGURA 4.9 IDEALIZACIÓN DE LAS GOTAS DE AGUA.

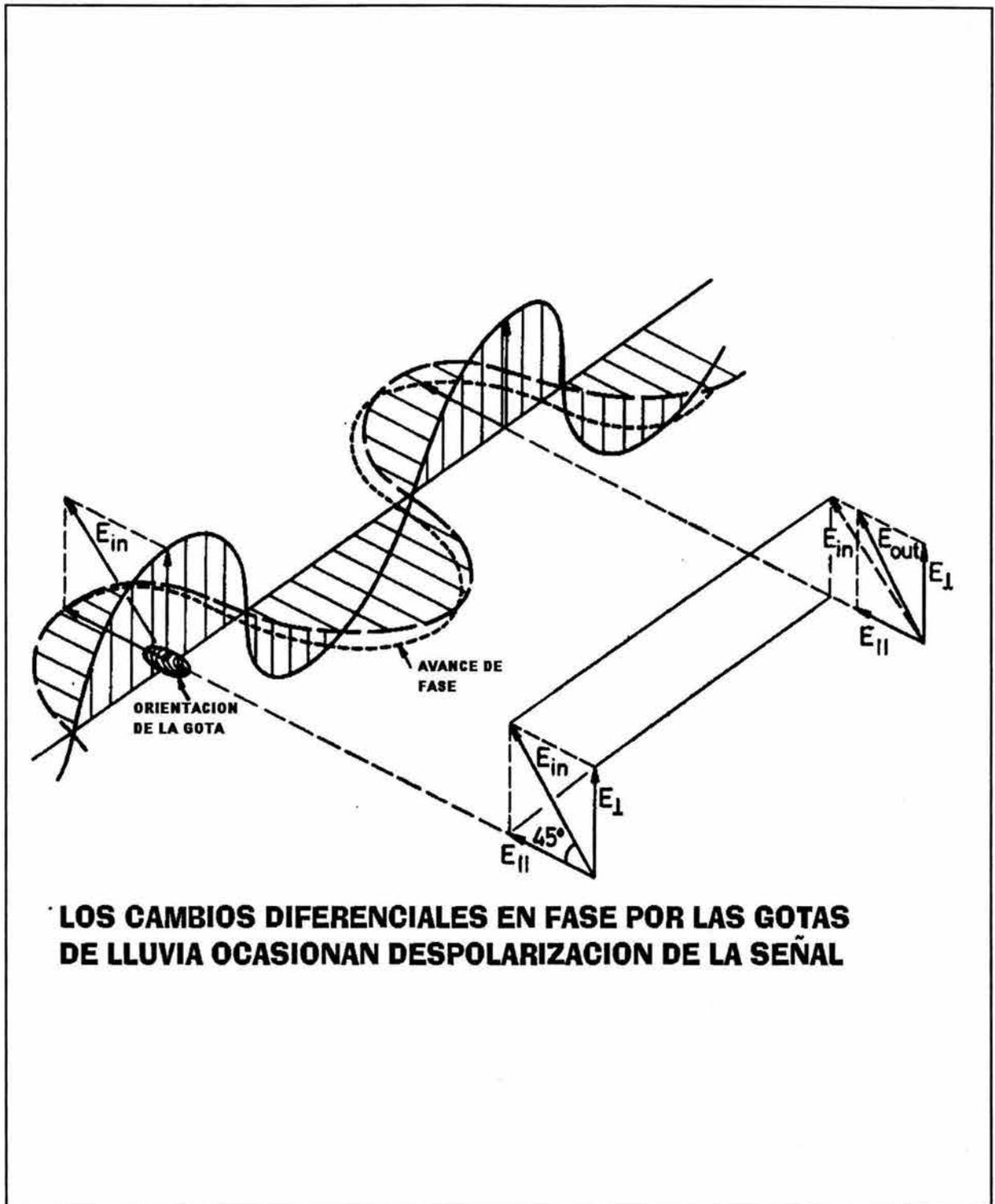


FIGURA 4.10 DESPOLARIZACIÓN CON LAS GOTAS.

Por consiguiente hay menor atenuación para la polarización vertical que para la polarización horizontal como se muestra en la siguiente tabla:

COEFICIENTES PARA ESTIMAR LA ATENUACIÓN ESPECÍFICA DE LA LLUVIA				
Frecuencia GHz	K_H	K_V	α_H	α_V
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
10	0.0101	0.0087	1.276	1.264
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
30	1.187	0.167	1.021	1
40	0.350	0.31	0.939	0.929

4.4.3 ATENUACIÓN POR PÉRDIDAS ENTRE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO SATELITAL

En los equipos es imposible un perfecto acoplamiento entre componentes como son los multiplexores, mezcladores, filtros, acopladores, guías de onda, etc., por lo que aparecen pequeñas pérdidas siempre menores a 1 dB asociadas a la circuitería.

La energía de la onda electromagnética que viaja entre el transmisor y el receptor siempre se dispersa y esto se interpreta como una pérdida de potencia para los receptores, pues únicamente llega parte de la potencia transmitida.

Además, la presencia de diversos obstáculos en la trayectoria del enlace, que van desde electrones libres o iones, oxígeno, vapor, nubes, granizo y en especial la lluvia, ocasionan absorción, reflexión, refracción y dispersión de las ondas que se interpreta como atenuación de la señal.

4.5 DESPOLARIZACIÓN EN LOS ENLACES SATELITALES

En la zona lejana las ondas electromagnéticas radiadas por una antena tienen las características de una onda electromagnética transversal o TEM plana, con los vectores E y H perpendiculares entre sí y ortogonales a la normal al plano.

Los campos son funciones del tiempo y el campo magnético varía exactamente en fase con el campo eléctrico, sus amplitudes son proporcionales y están relacionadas por la fórmula:

$$E = Z_0 H$$

donde $Z_0 = 120 \pi$

Por consiguiente es suficiente sólo considerar el campo eléctrico; la dirección dada por su vector determina la polarización de la onda electromagnética. De esta forma las ondas pueden propagarse lineal o circularmente (el caso general resulta elíptico). Las primeras transmisiones lineales se consideraban horizontales si la dirección de polarización era a lo largo de la superficie de la tierra y verticales cuando eran perpendiculares a la tierra, actualmente dichos términos sólo significan transmisiones ortogonales entre sí o de componentes izquierda y derecha de la señal (ver fig. 4.11):

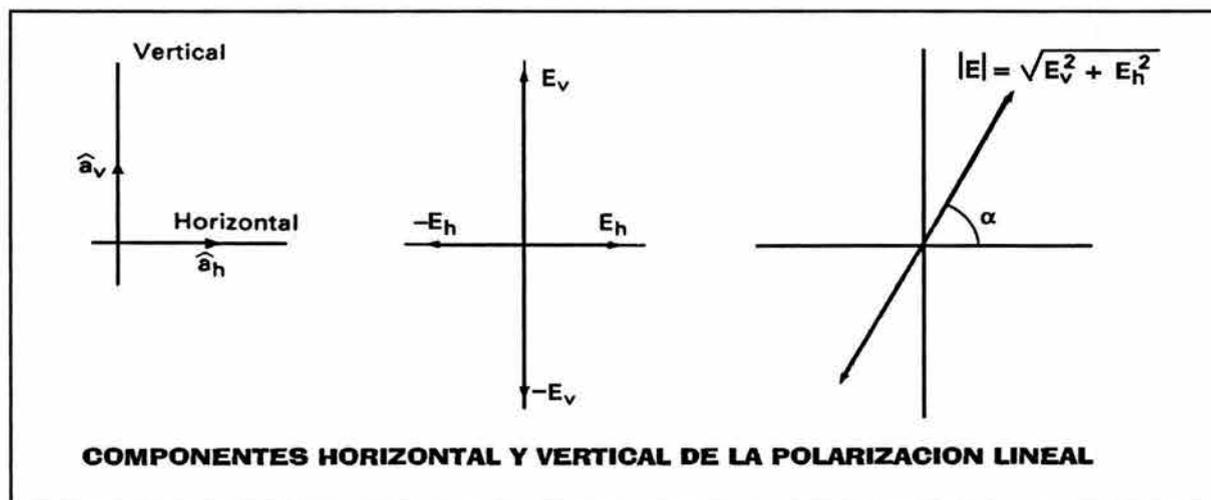


FIGURA 4.11 COMPONENTES DE LA POLARIZACIÓN LINEAL.

Dado que dos ondas electromagnéticas de la misma frecuencia polarizadas ortogonalmente son independientes (fig. 4.12), la capacidad de un canal de comunicaciones se incrementa al doble, por

lo que actualmente se emplean ampliamente estas técnicas de "reuso de frecuencias", polarizando lineal o circularmente las señales.

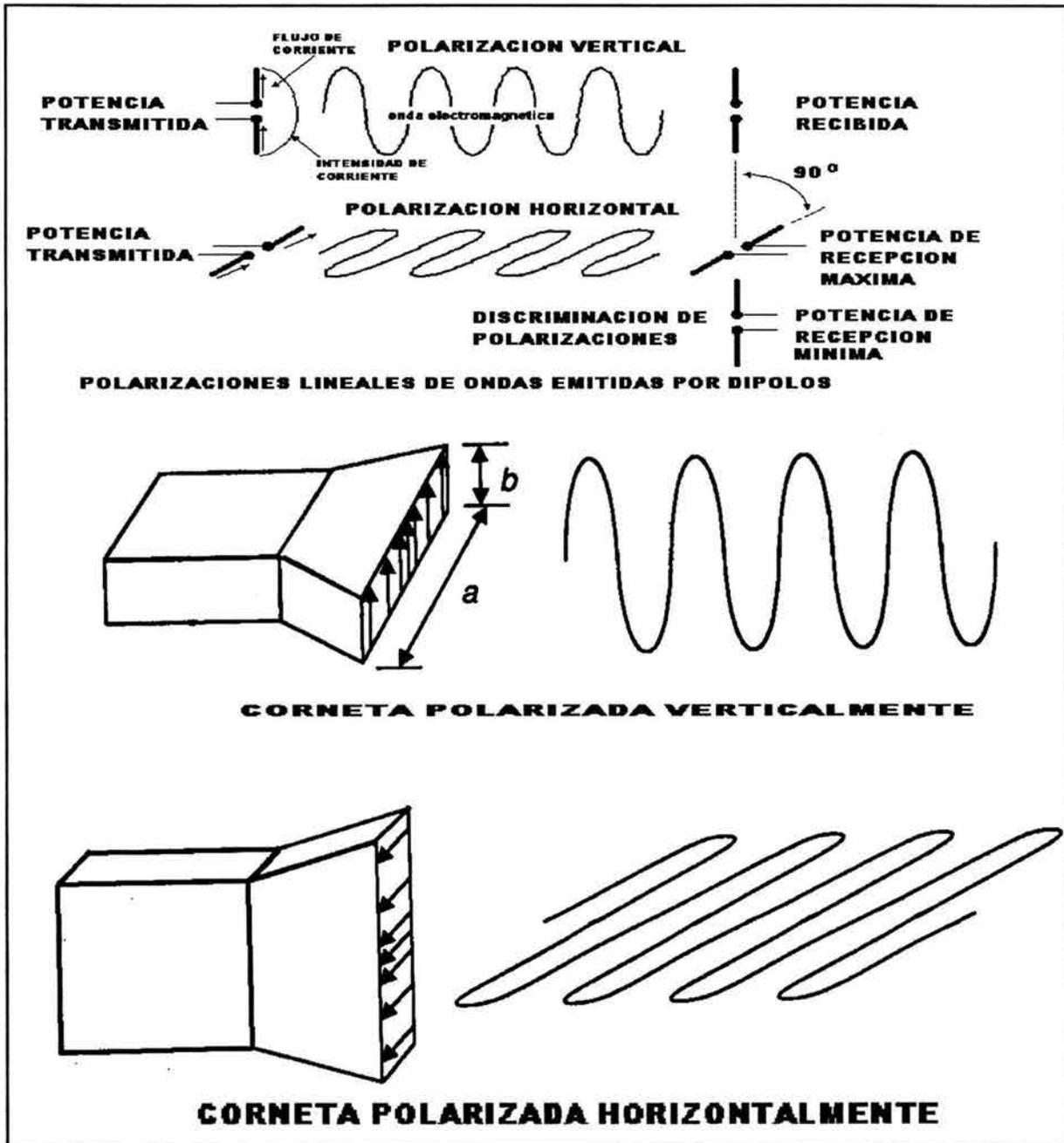


FIG 4.12 POLARIZACIONES ORTOGONALES

Sin embargo, cuando dos ondas ortogonales se despolarizan, pueden interferirse y degradar la calidad de la transmisión.

4.5.1 ATENUACIÓN Y DESPOLARIZACIÓN DEBIDA A COMPONENTES ATMOSFÉRICOS Y ELECTRONES DE LA IONÓSFERA.

La ionósfera cambia continuamente su altura en función del dinamismo del clima. En general se puede ubicar de 80 a 600 km. sobre la superficie terrestre y su altura varía del día a la noche. Afecta a algunas de las comunicaciones no guiadas por su alto contenido de electrones libres que pueden absorber la energía de las ondas electromagnéticas que chocan con ellos, produciéndose reflexión, absorción y refracción en función de la frecuencia de las ondas electromagnéticas; sin embargo en determinadas frecuencias (menores a 100 MHz) parte de la ionósfera actúa como espejo y permite que las ondas alcancen mayor o menor distancia de propagación dependiendo de la altura a la que se encuentra, pues como se indicó, durante el día se genera una subcapa a menor altura.

Entre más alta es la frecuencia, se presentan mayores problemas de atenuación de las ondas electromagnéticas con el oxígeno molecular, vapor y lluvia, pues ocurren efectos de resonancia cuando la longitud de onda de la señal se equipara con el tamaño de las partículas o moléculas presentes. Desde el punto de vista práctico este efecto se traduce en pérdidas pues la energía se dispersa.

Como ya se indicó, a partir de las frecuencias de la banda Ku, la lluvia juega un papel muy importante en la atenuación de la señal pues se presenta:

- a) la resonancia de las moléculas y gases,
- b) la despolarización,
- c) la interferencia y,
- d) el incremento en el ruido que detecta la estación terrena.

Como ejemplo del cambio en la polarización, consideremos una onda linealmente polarizada, expresada a través de sus componentes horizontal y vertical, con un ángulo τ con respecto de la horizontal que presenta el eje mayor del esferoide de una gota; podemos observar entonces que verticalmente el campo E encuentra menor cantidad de agua que horizontalmente y, por consiguiente, hay diferencias en fase y atenuación, por consiguiente aparece un retraso diferencial de fase mucho mayor que la atenuación diferencial en la despolarización de la señal, según se observa en la fig. 4.13:

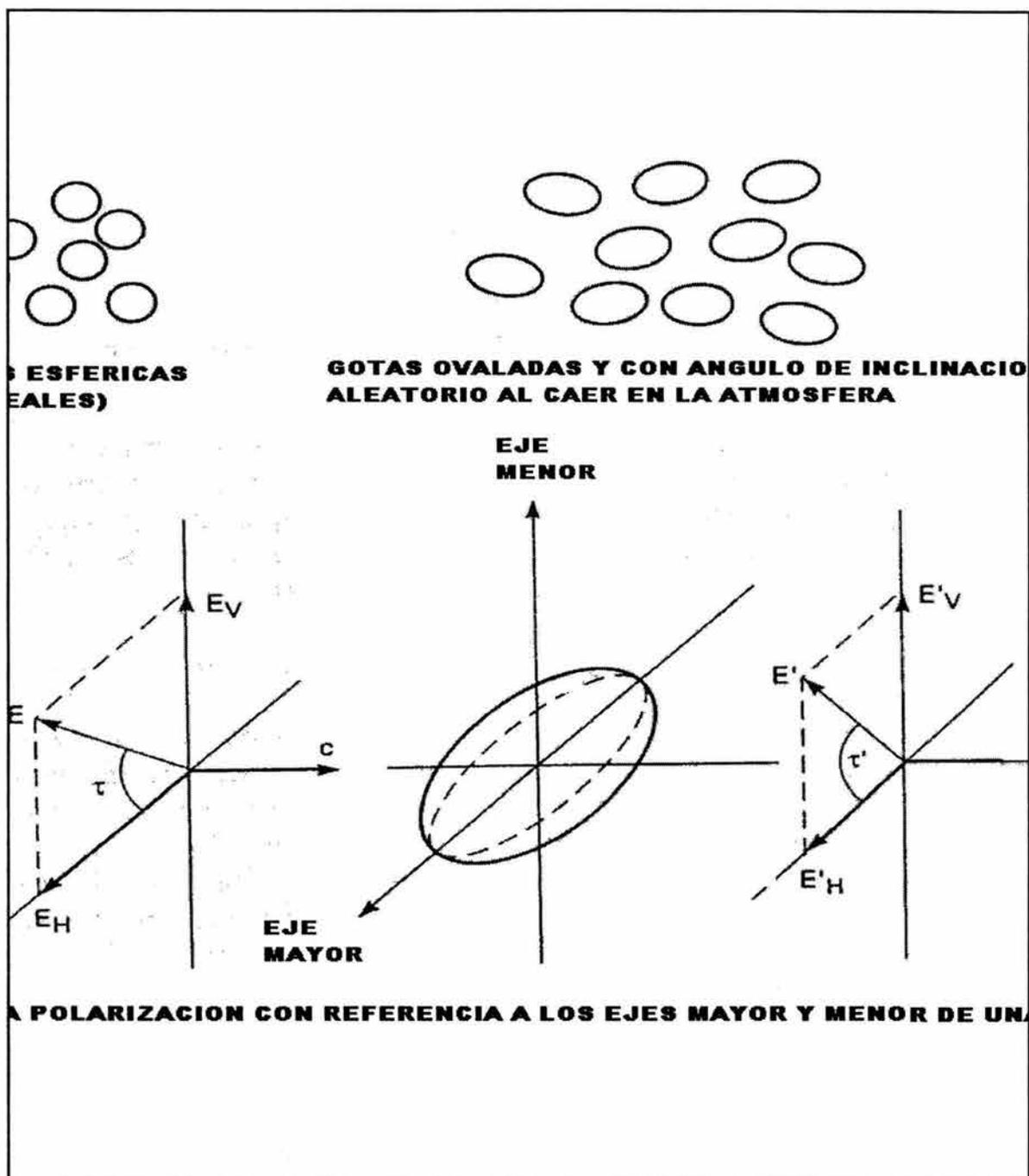


FIGURA 4.13 POLARIZACIÓN HORIZONTAL Y VERTICAL EN UNA GOTA

La discriminación por polarización cruzada debida a la lluvia puede calcularse con muy buenos resultados mediante la aproximación empírica proporcionada por el CCIR :

$$XPD = U - V \log A$$

A atenuación total calculada

U, V, son coeficientes empíricos en dB que se calculan con

$$U = 30 \log f - 10 \log (0.5 - 0.4697 \cos 4 \tau) - 40 \log (\cos \theta)$$

$$V = \begin{cases} 20 & \text{para } 8 \leq f \leq 15 \text{ GHz} \\ 23 & \text{para } 15 \leq f \leq 35 \text{ GHz} \end{cases}$$

f = frecuencia en GHz.

θ = ángulo de elevación de la estación terrena

τ = ángulo de inclinación de la polarización con la horizontal

4.5.2 CAUSAS Y CARACTERÍSTICAS DE LA DESPOLARIZACIÓN DE LAS SEÑALES

<p>POR HIDROMETEOROS</p>	<p>La despolarización por lluvia y Cristales de hielo, representa un problema para frecuencias arriba de 3 GHz.</p> <p>En el caso de lluvia intensa, las gotas de lluvia pasan de forma esférica a esferoides oblicuos y las características de la despolarización dependen fuertemente del ángulo con que se transmite.</p> <p>La presencia de cristales de hielo, de tamaño pequeño comparado con la longitud de onda, puede anteceder a nubes o precipitación pluvial y producir despolarización. Los cristales producen también despolarización durante las descargas eléctricas.</p>
<p>POR MULTI TRAYECTORIAS DE PROPAGACIÓN</p>	<p>La despolarización es tanto por turbulencia troposferica como por reflexiones ionosfericas; también puede ocurrir debido a reflexión y dispersión por las irregularidades de la superficie terrestre y por cambios en el índice de refracción en la atmósfera.</p> <p>Representa un problema para frecuencias abajo de 3 GHz, debido a siempre ocurren condiciones de multitrayectoria que representan un grave problema bajo cualquier ángulo de elevación en la transmisión. Este problema se minimiza enormemente mediante antenas de alta directividad.</p>
<p>POR CAPAS DE ELECTRONES EN LA IONÓSFERA</p>	<p>Los electrones en la ionósfera no se distribuyen uniformemente pero si forman capas o nubes de electrones que ocasionan la rotación de la polarización de las señales que las atraviesan (esto en función de la longitud de la nube, la intensidad del campo magnético de la tierra en esa región y la densidad de electrones). En polarizaciones lineales causa retraso de la polarización y el fenómeno se denomina rotación de Faraday y no es mayor problema para frecuencias superiores a 10 GHz.</p>
	<p>Cuando se altera la polarización de una señal, se transfiere o acopla energía hacia la señal ortogonal que la acompaña, produciéndose interferencia o diafonía entre los canales.</p>

4.6 ROTACIÓN DE FARADAY

Es el fenómeno de rotación en el plano de polarización de las ondas electromagnéticas inferiores a los 10 GHz, y se debe principalmente a la diferencia entre las constantes de propagación de las componentes izquierda y derecha de una onda polarizada circularmente, que ocasiona que las dos componentes rotatorias de la onda viajen con diferentes velocidades de propagación.

Dicha diferencia está en función de:

- la dirección de propagación de la onda respecto al campo magnético terrestre,
- de la intensidad del campo magnético y
- de la frecuencia de resonancia de los electrones en la ionósfera.

También se observa que la diferencia es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia. Su comportamiento es completamente cíclico y regular a lo largo del año con variaciones diurnas, y estacionales, de acuerdo a los cambios de manchas solares, es decir este comportamiento es totalmente predecible.

Otros factores de despolarización son la lluvia, partículas de hielo y las multitrayectorias, con problemas hasta los 12 GHz. La despolarización por multitrayectoria está limitada por un ángulo de elevación muy bajo y depende también de las características de polarización de la antena receptora. Afecta seriamente las comunicaciones abajo de 1 GHz y de VHF que emplean polarización lineal.

La unidad de medida más común se denomina "discriminación de polarización cruzada" (XPD o cross-polarization discrimination). Por ejemplo para una señal con polarización lineal que produce un campo E en la antena cuando no está presente la rotación de Faraday y recibe una potencia proporcional a E^2 , una rotación de θ_F grados produce una componente copolarizada (señal deseada) reducida a

$$E_{co} = E \cos \theta_F \quad \text{y una componente con polarización cruzada}$$

$$E_x = E \sin \theta_F, \quad \text{con lo que la discriminación de la polarización cruzada}$$

es:

$$XPD = 20 \log \frac{E_{co}}{E_x} = - 20 \log (\cot \theta_p)$$

de esta forma la pérdida de polarización (PL) en decibele es:

$$PL = 20 \log \frac{E_{co}}{E} = 20 \log (\cos \theta_p)$$

En 1981, Miya determinó como valores máximos de la rotación de Faraday de 9° para 4 GHz y de 4° para 6 GHz.

4.7 RETARDO DE GRUPO

La presencia de electrones libres en la trayectoria de propagación retarda la velocidad de grupo de la onda electromagnética, y ocasiona un retardo con relación al tiempo de viaje en el espacio libre que alcanza los 25 microsegundos para frecuencias de 100 MHz en las comunicaciones tierra - aire cuando se emplea un ángulo de elevación de 30 grados. Este fenómeno es aproximadamente proporcional al recíproco del cuadrado de la frecuencia.

4.8 DISPERSIÓN Y CINTILACIÓN EN EL ENLACE SATELITAL

Las turbulencias en la atmósfera desvían ligeramente la trayectoria de propagación de las ondas provocando multi trayectorias que refuerzan o disminuyen la amplitud de las ondas recibidas, es decir, cintilación o desvanecimientos de la señal (fig. 4.14); esto también lo ocasionan las nubes y vapor al cruzar la trayectoria de la señal pues las moléculas son como dipolos cuyo momento sigue al campo eléctrico.

La ionósfera también contribuye con ligera cintilación que depende en gran medida de la aparición de manchas solares y la hora del día; esto afecta a frecuencias menores a 6 GHz principalmente.

Los efectos de cintilación troposferica e ionosférica casi no perturban a los enlaces satelitales en México pues los ángulos de elevación no son menores de 20° y los cálculos de los enlaces por lo general prevén la potencia necesaria que prácticamente anula sus efectos.

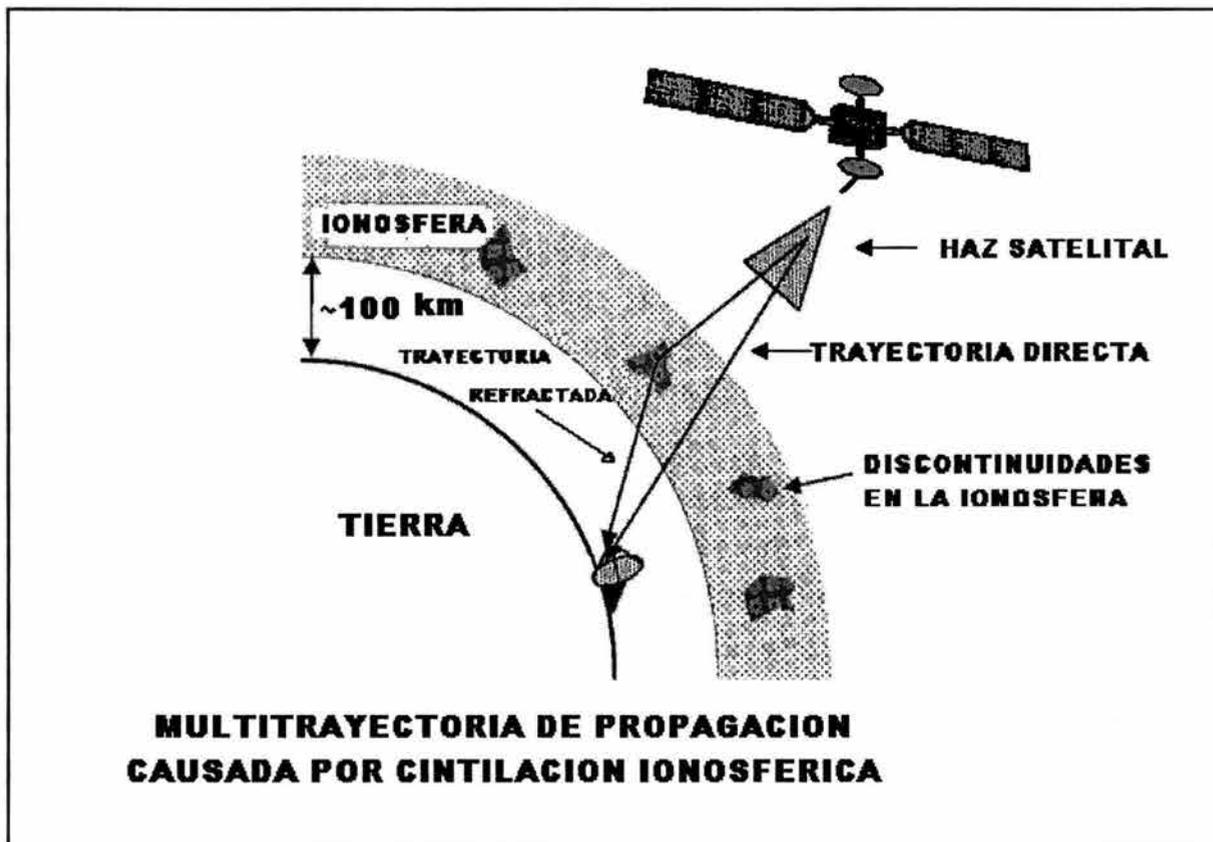


FIGURA 4.14 DESVANECIMIENTOS POR MULTI TRAYECTORIA.

4.9 REFRACCIÓN EN LA ATMÓSFERA

El índice de refracción está en función de la concentración de gases y disminuye con la altura; el CCIR establece como atmósfera de referencia a aquella en la que la refracción está dada por:

$$N(h) = 315 e^{-0.136 h} \quad \text{unidades } N$$

$h = \text{altura en km.}$

que corresponde con un valor promedio sobre la superficie terrestre a través de los años y estratificada en sentido horizontal (éste es un modelo ideal pues la atmósfera no es homogénea y presenta fluctuaciones aleatorias del índice y no según estratos). Como resultado de la variación del índice de refracción, la trayectoria de las ondas electromagnéticas que atraviesan la atmósfera se curva hacia la región de mayor índice de refracción y aparece una posición virtual del satélite ligeramente más alta a la de su posición verdadera (fig. 4.15), en consecuencia, con los cambios de temperatura, nubes, etc., se producen discontinuidades y fluctuaciones pues la atmósfera no resulta uniforme y se produce un "curvamiento aleatorio" (hacia abajo o superrefracción o hacia arriba o subrefracción), que ocasiona un desvanecimiento similar a la atenuación por lluvia. Esto afecta principalmente la propagación de los servicios de radiodifusión y TV

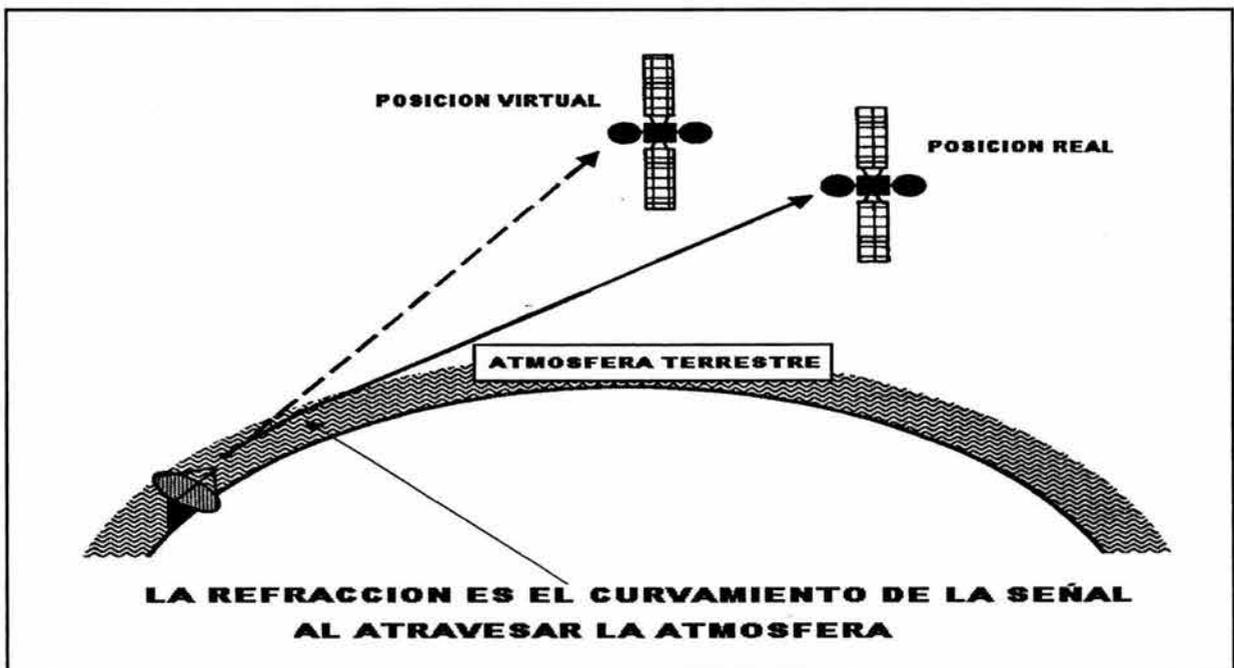


FIGURA 4.15 DESVANECIMIENTO POR CURVAMIENTO ALEATORIO.

4.10 RUIDO EN LA RECEPCIÓN

Principalmente en las comunicaciones inalámbricas o no guiadas, la señal recibida está contaminada por ruidos internos y externos; los internos pueden producirse en la antena y en los elementos que componen el receptor. Los ruidos externos se pueden clasificar como sigue:

- a) Por emisiones radioeléctricas de la tierra (emisiones superficiales que dependen de la temperatura de la superficie, su rugosidad y tipo, que incrementan la temperatura de "brillo" de la antena para la que un valor común aceptado es de 290 K), así como por emisiones no deseadas existentes en la vecindad atmosférica. El ángulo de elevación pequeño de la antena ocasiona captar mayor ruido de la superficie terrestre: además los errores de apuntamiento de las antenas deterioran la ganancia y pueden afectar también la polarización de las señales.
- b) Por interacción con todo tipo de gases o elementos absorbentes en la trayectoria de la señal (gases, nubes, oxígeno, vapor y lluvia) que, además de atenuar, transforman en calor parte de la onda electromagnética e incrementan la temperatura de "brillo" de la antena receptora (un aumento en esa temperatura implica aumento de ruido). La superficie mojada de la antena también deteriora las señales de las altas frecuencias.
- c) De origen atmosférico debido a rayos y relámpagos, denominado como parásitos atmosféricos que afecta principalmente a las bandas VLF, LF.
- d) De origen humano por la presencia de chispazos en motores eléctricos, líneas de alta tensión, sistemas de radar, etc.
- e) Por fuentes extraterrestres, principalmente la radiación solar (del orden de 10^4 y 10^5 [K] o mayor en caso de fuerte actividad solar) y el ruido intergaláctico (importante para frecuencias inferiores a 2 GHz salvo que sea de 2.7 [K]), en segundo plano está el ruido cósmico de fondo.

Cuando el sol incide sobre el eje principal de una antena y en especial si su ancho del haz es de 0.5° o menor produce tal intensidad de ruido que interrumpe el enlace, debido a ello se calcula inclusive las veces

que esto ocurre y se contabiliza en minutos por año el tiempo fuera de la estación. El paso de la luna sobre el eje de la antena también aumenta durante minutos la cantidad de ruido.

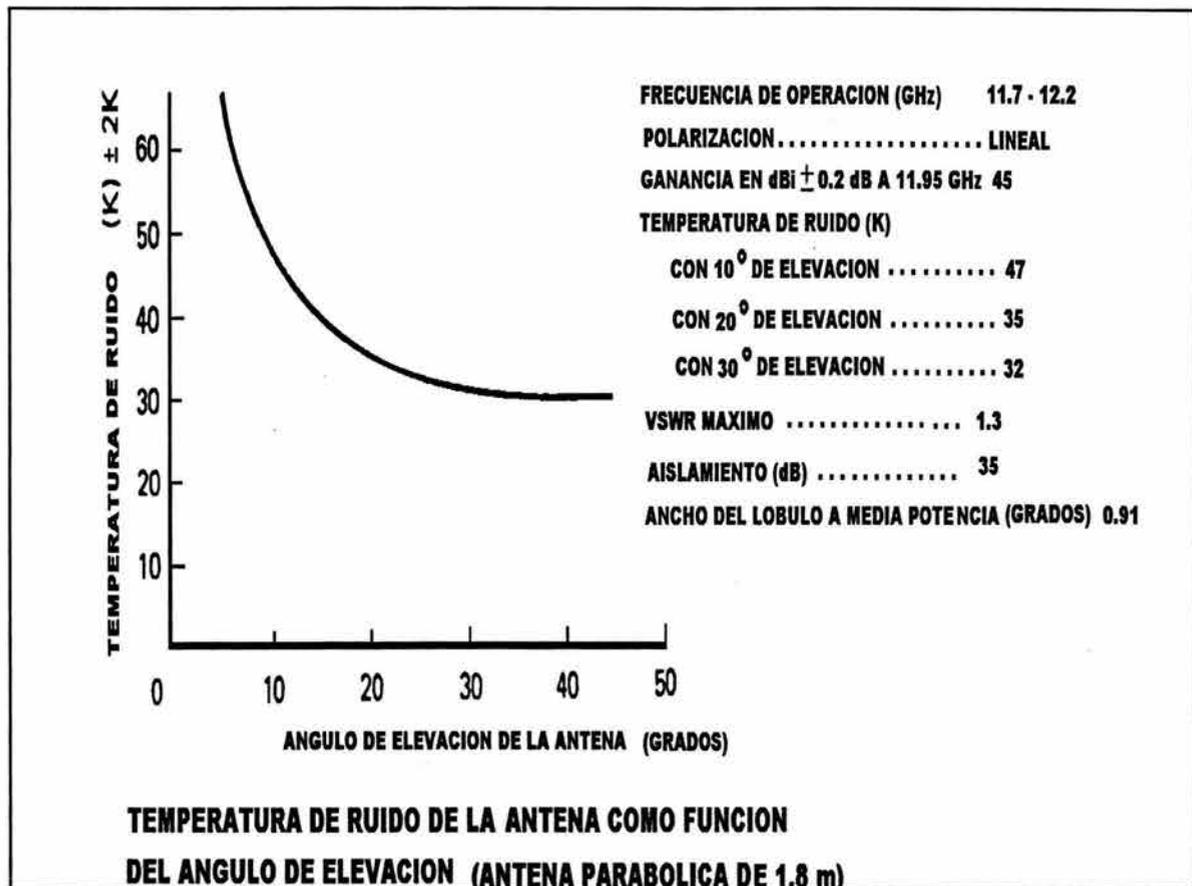


FIGURA 4.16 TEMPERATURA DE RUIDO VS. ÁNGULO DE ELEVACIÓN

La característica principal de las fuentes de ruido es su temperatura de brillo T_b [grados Kelvin (K)], que nos permite calcular la potencia de ruido radiada por la fuente en una banda de frecuencias. Equivale a la temperatura física de un cuerpo negro que emite la misma potencia en esa banda, con características direccionales. Cada elemento sobre la tierra posee cierta temperatura de brillo que permite clasificarlo, por ejemplo cultivos, altura de olas, animales, ciudades, recursos minerales, etc. Esta temperatura depende fuertemente de la dirección y cambia al variar la frecuencia.

En forma práctica la temperatura de brillo equivale a la temperatura que disipa una resistencia para producir una potencia igual, es decir:

$$P_N = \frac{V_N^2}{4R} = k T_a B$$

P_N = potencia de ruido disponible en los bornes de la antena

V_N = tensión en circuito abierto [rms]

R = resistencia

$k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K [cte de Boltzman]

T_a = temperatura de brillo de la antena

B = ancho de banda

Por otro lado la atenuación que presenta la atmósfera está en función de la frecuencia de transmisión, a la cual está asociada la generación de ruido térmico. La temperatura de brillo debida a la atenuación atmosférica se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$T_b(\Psi) = T_m \left(1 - 10^{-\frac{L}{10}} \right)$$

T_m = temperatura física de la atmósfera

La temperatura de brillo aumenta en las frecuencias de fuerte absorción molecular, misma que puede incrementarse si la atenuación aumenta por la presencia de lluvia. En frecuencias arriba de los 30 GHz sólo importa el efecto de fuentes próximas pues la ionósfera resulta prácticamente transparente.

Dado que las antenas se instalan en ambientes no uniformes ni estables desde el punto de vista térmico, debe estimarse o ponderarse la potencia de ruido incidente por unidad de ángulo sólido en cada dirección del espacio, siempre y cuando sea relevante en la banda de trabajo de la antena y su temperatura de brillo. La temperatura de brillo del sol y la luna siempre se consideran aparte cuando el haz principal o un lóbulo secundario de la antena apunta hacia ellos pues como se mencionó previamente, causan interrupciones que no se consideran en el cálculo del enlace.

$$T_b = \frac{\int \int_{4\pi} T_b(\Omega) D(\Omega) d\Omega}{4\pi}$$

Considerando todo lo relevante para el caso, la temperatura de ruido de la antena se calcula con:

$$T_a = \frac{1}{4\pi} \int \int_{4\pi} T(\Omega) D(\Omega) d\Omega = \frac{1}{\lambda^2} \int \int_{\pi} T(\Omega) A_{ef}(\Omega) d\Omega \quad [^\circ\text{Kelvin}]$$

λ = longitud de onda de la onda

$T(\Omega)$ = suma de intensidades de ruido ponderadas e incidentes
en la antena

$A_{ef}(\Omega)$ = área efectiva de la antena

4.10.1 RUIDO PRODUCIDO POR LOS AMPLIFICADORES DE RADIOFRECUENCIA

La señal en el receptor de una estación terrena se ve afectada también por los ruidos que producen los circuitos. Estos ruidos son mayores para frecuencias de trabajo más altas, para abatirlos se diseñan amplificadores especiales denominados de bajo ruido (ABR o LNA). Los tipos básicos de amplificadores que se encuentran en el mercado se mencionan más adelante.

En las estaciones receptoras de distribución de señales de TV se combinan el amplificador de bajo ruido con un convertidor de reducción de banda ancha en una sola unidad que se instala directamente en la antena y se denomina LNB. Su función es convertir en su totalidad las señales recibidas a una frecuencia intermedia; el LNB se interconecta mediante cable coaxial en lugar de guías de onda. Las temperaturas de ruido de estos dispositivos deben ser menores de 30°K para la banda C y de 45 a 150°K para banda Ku, con ganancias de 60 a 70 dB.

4.10.1.1 PRINCIPALES AMPLIFICADORES DE BAJO RUIDO (ABR's o LNA's)

PARÁMETRICO ENFRIADO POR HELIO

Es el de menor temperatura de ruido (15 °K en banda C y 45 °K en banda Ku), sin embargo no se emplea debido a su complejidad y facilidad de falla.

ENFRIADO TERMOELECTRICAMENTE POR EFECTO PELTIER

Su temperatura típica es de 35 °K en banda C y de 80 a 100 °K en banda Ku.

DE EFECTO DE CAMPO SIN ENFRIAR

El modelo más reciente se denomina HEMT y es el más empleado. Sus temperaturas típicas son de 70 °K en banda C y de 130°K o mas en banda Ku.

4.10.2 PRINCIPALES FUENTES DE RUIDO EN EL EQUIPO RECEPTOR

POR MOVIMIENTO ALEATORIO DE ELECTRONES EN COMPONENTES ELECTRÓNICOS

Ocurre tanto en dispositivos activos como pasivos del receptor.

RUIDO TÉRMICO DEL AMBIENTE

La energía captada por las antenas origina corrientes en las superficies de las antenas que, por su carácter resistivo, ocasiona ruido térmico. Ésta proviene de la troposfera y el suelo.

RUIDO ESPACIAL

Es una radiación de microondas producida en todas las frecuencias por la materia misma bajo temperaturas finitas. De esta forma una antena que barre desde el espacio hacia la tierra pasa por tres regiones de ruido: de ruido galáctico, de bajo ruido y de ruido troposférico.

Las señales no deseadas (interferencias) generalmente se consideran aparte.

Para toda telecomunicación a través de la atmósfera debe tenerse en cuenta el entorno en general, pues afectan factores tan diversos e inestables como:

- la conductividad del suelo,
- el índice de refracción de la atmósfera,
- la densidad de ionización de la ionósfera y su altura,
- la temperatura y principalmente,
- la presencia de diversos fenómenos meteorológicos, de entre los cuales el más importante es la intensidad y frecuencia de tormentas, además,
- la interferencia electromagnética producida por algunas actividades humanas, generalmente en bajas frecuencias (Plantas industriales, motores, etc...).
- la energía proveniente del espacio exterior emitida por estrellas, otros cuerpos celestes y las diversas galaxias.

4.11 COHERENCIA EN EL ANCHO DE BANDA

La mayoría de los medios de comunicación o canales actúan como filtros, limitando el ancho de banda y en consecuencia la tasa de transmisión de las señales digitales. En especial las señales con gran ancho de banda son sensibles a los efectos de dispersión de amplitud y fase que, cuando son importantes, causan la pérdida de coherencia en todo el ancho de banda de la señal con la consecuente pérdida o distorsión de la información que viaja en la señal portadora.

Sin embargo las pruebas con anchos de banda del orden de 1 GHz en las comunicaciones tierra - aire de los sistemas que operan en frecuencias superiores a los 10 GHz, con ángulos de elevación mayores de 15 grados no han encontrado problemas mayores en la dispersión de amplitud y fase.

Como resumen a continuación se presentan los principales:

4.12 RESUMEN DE PROBLEMAS DE ATENUACIÓN EN UN ENLACE

	POR DISPERSIÓN EN CIELO DESPEJADO	CON LA DISTANCIA LA POTENCIA SE DISPERSA Y LA SEÑAL RECIBIDA EN UN LUGAR ESTÁ ATENUADA Y SU POTENCIA VARIA INVERSAMENTE PROPORCIONAL CON EL CUADRADO DE LA DISTANCIA.	
		ABSORCIÓN EN LA IONOSFERA	Su contenido electrónico afecta la polarización que se traduce en atenuación.
		CONCENTRACIÓN DE VAPOR	Afecta a frecuencias altas. La absorción por vapor es lineal y proporcional a la cantidad de vapor.
TIPOS DE ATENUACIÓN	POR ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA E HIDROMETEOROS	OXÍGENO Y CONTAMINACIÓN	El oxígeno absorbe la señal de manera constante. La contaminación atenúa, según su concentración, las altas frecuencias.
		LLUVIA	Atenúa la señal notoriamente a partir de banda Ku. (factor de mayor peso en el enlace)
		NUBES, NIEBLA Y GRANIZO	El granizo despolariza. Las nubes atenúan proporcionalmente al cuadrado de la frec.
		ÁNGULO DE ELEVACIÓN	A menor ángulo, mayor atenuación por fusión de partículas congeladas y cintilación.
		APUNTAMIENTO DE ANTENA	Los ángulos de desalineación afectan la ganancia de las antenas en los límites de la cobertura y la polarización.
		AGUA Y ALTURA DE LA ANTENA	La antena mojada presenta atenuación en altas frecuencias. La cercanía a la tierra capta emisiones superficiales (ruido diverso).
	POR CIRCUITERÍA Y DIRECCIONAMIENTO	EQUIPO Y GUÍAS DE ONDA	La temperatura de componentes genera ruido y los acoplamientos pérdidas.
<p>Las características atómicas, moleculares y macroscópicas de los elementos presentes en la atmósfera determinan la absorción de energía que se transforma en calor, el desvío de las ondas de su trayectoria original con posible despolarización y aumento de ruido en la señal.</p>			

CAPÍTULO 5. MODELOS MATEMÁTICOS PARA CÁLCULO DE ATENUACIÓN POR LLUVIA

Las señales portadoras de los enlaces satelitales son afectadas por hidrometeoros, gases y partículas diversas presentes en la trayectoria entre las estaciones terrenas y el satélite. Su energía, en mayor o menor medida, es:

- desviada,
- reflejada,
- despolarizada,
- absorbida o dispersada;

Estos fenómenos ocasionan, principalmente, atenuación de las señales que se reciben con la consecuente afectación; para que una señal los enfrente sin consecuencias graves, el cálculo del enlace debe tomar en cuenta las condiciones atmosféricas de mayor lluvia, sin incluir ciclones o situaciones extraordinarias que, según las estadísticas, también ocurren cíclicamente. Se remarca que, en estas consideraciones, no es posible incluir esos casos de desastre.

El objetivo de los cálculos de un enlace es por tanto asegurar la mayor disponibilidad del mismo, dentro de costos aceptables, es decir, con la potencia óptima para que la señal enfrente la mayoría de los eventos sin consecuencias graves.

Dado que en frecuencias de microondas la principal causa de atenuación es la lluvia, han sido elaborados diversos modelos matemáticos para predecir la atenuación que ésta puede causar.

Los modelos de predicción permiten obtener mapas de atenuación, con base en los datos estadísticos pluviométricos recolectados para cada una de las diversas regiones climáticas que se consideran.

Por consiguiente, en las telecomunicaciones los resultados calculados con los modelos de atenuación, dan el punto de partida para la obtención de parámetros que garantizan una disponibilidad deseada en un enlace satelital. Estos modelos han sido específicamente

desarrollados con los datos comprobados de países tecnológicamente desarrollados e información general del resto del mundo, es decir, se les emplea extrapolando para otras regiones del planeta.

Como es sabido, en frecuencias arriba de 10 GHz, la presencia de lluvia constituye el principal factor de atenuación en los enlaces satelitales que, a su vez, disminuye la "disponibilidad del servicio", pues aumenta el número de posibles interrupciones. El tiempo de interrupción anual del servicio se expresa en porcentaje y se denomina "porcentaje de tiempo excedido".

En el cálculo de un enlace satelital se busca que éste mantenga la calidad pedida en las relaciones C/N de subida y de bajada la mayor parte del tiempo que sea posible, los valores comunes de disponibilidad van del 99.9 al 99.99% o más, mediante una adecuada utilización de los recursos disponibles.

Una disponibilidad del enlace del 99.99%, implica que se ha estimado un excedente de potencia que permite soportar atenuaciones por lluvia para casos en los que se excede la cantidad acumulada de lluvias que estadísticamente conforman el $(100 - 99.99) = 0.01\%$ de la duración del año, (es decir para algo más de la lluvia que se acumula en $315,360 \text{ seg} = 87.6 \text{ horas} = 3.65 \text{ días}$). El valor de las lluvias acumuladas para un exceso del 0.01% en la Ciudad de México es de 82 mm/hr., según el mapa de Crane.

Es obvio que bajo mayores requerimientos de disponibilidad, se requieren mayores recursos, tanto en potencia de transmisión como en tamaño de antenas o características especiales del equipo. De esta manera, una relación C/N adecuada, permite estimar el margen de potencia necesario que mantiene el enlace sin problemas graves, bajo costos óptimos. Además, para un manejo óptimo de recursos, se debe realizar, en la medida de lo posible, cálculos y mediciones prácticas en los lugares de interés que validen los resultados de los modelos. Por ello se presenta la teoría detallada de algunos de ellos y se comparan teóricamente sus resultados, mismos que se sugiere comprobar mediante mediciones con el sistema satelital instalado en la Facultad de Ingeniería.

5.1 MODELO DE CRANE

Fue desarrollado con base en datos estadísticos de norteamérica y la variación vertical de su temperatura atmosférica; ha sido usado para extrapolar la atenuación de regiones climáticas de otros lugares. Por consiguiente ha sido uno de los modelos de mayor uso para el cálculo de atenuación en los enlaces satelitales, pues toma en cuenta datos meteorológicos y climáticos específicos de la región de interés como son:

- altura y ángulo de elevación de la estación terrena,
- altura de la isoterma de 0° C, misma que se determina estadísticamente como función dependiente de la latitud de una zona dada y de la probabilidad de ocurrencia (ver Fig. 5.1).,
- observaciones geofísicas sobre la intensidad de la lluvia en mm/hr, estructura de la misma y variación vertical de la temperatura atmosférica.

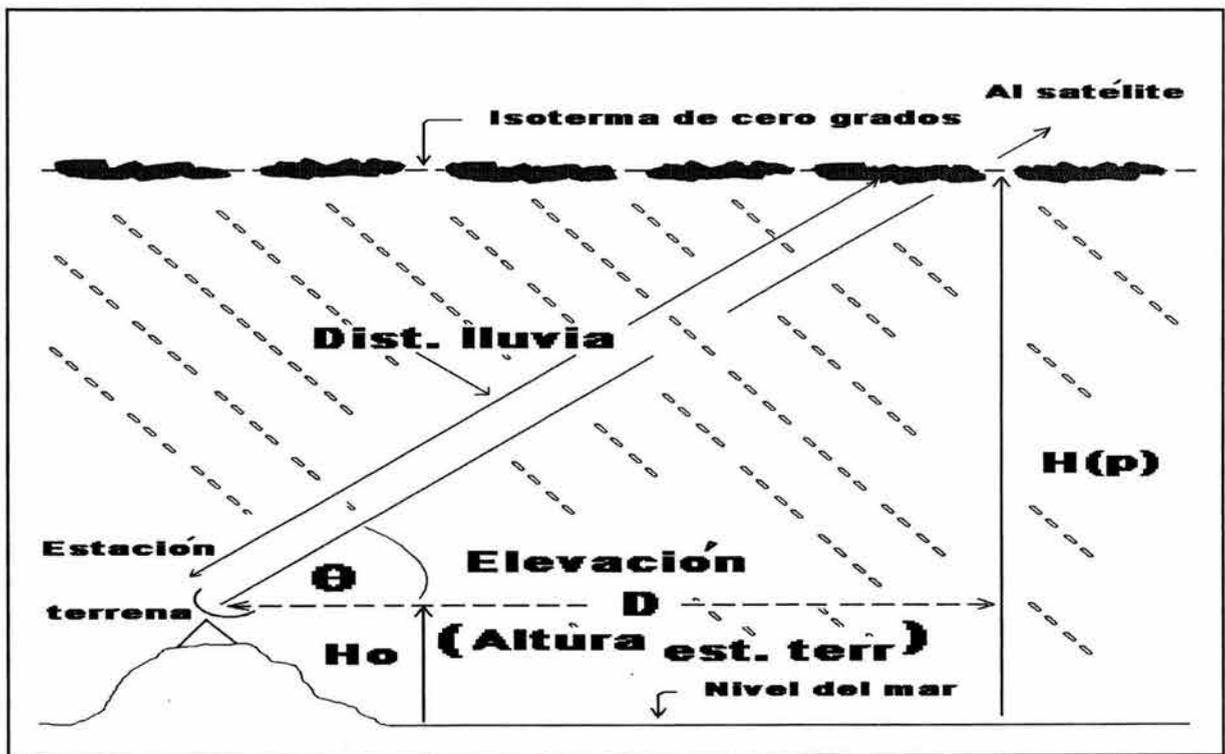


FIGURA 5.1 DISTANCIA CON LLUVIA QUE RECORRE LA SEÑAL

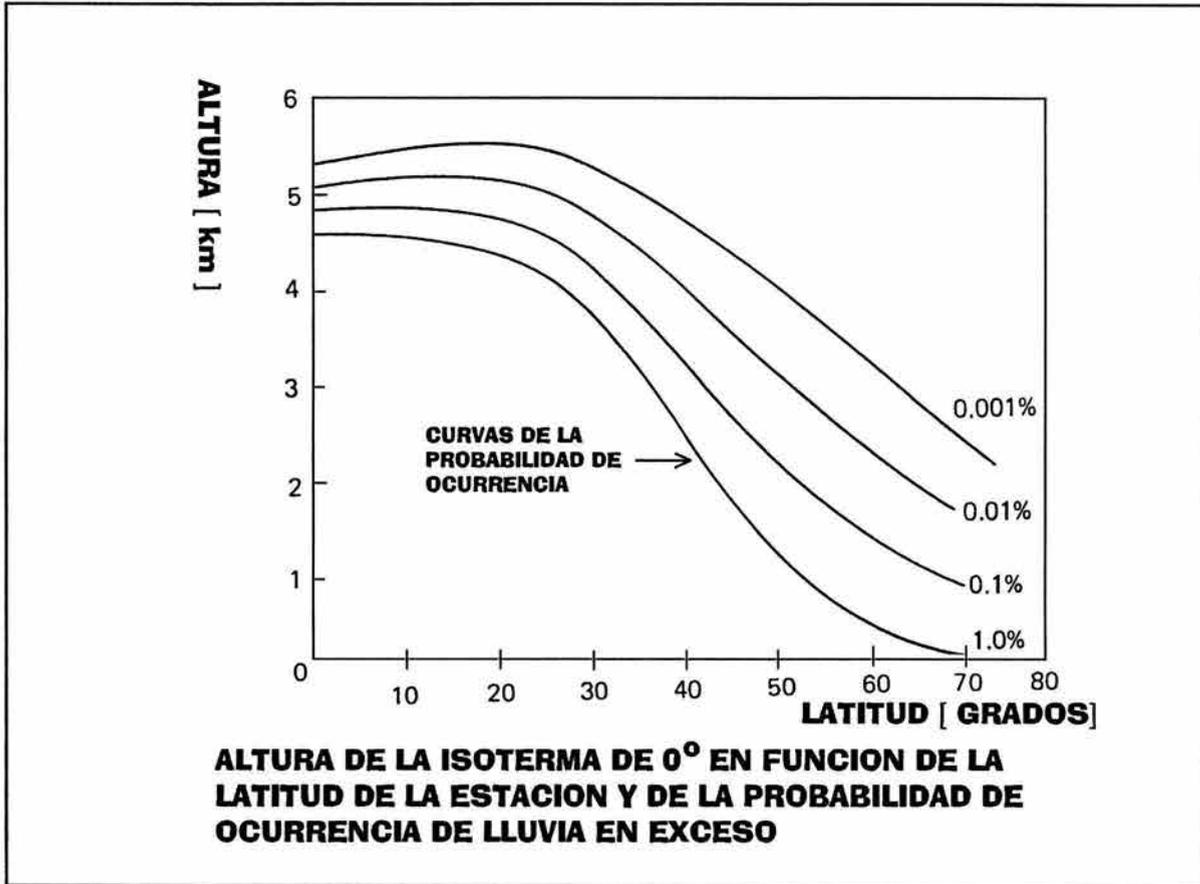


FIGURA 5.2 ISOTERMA EN FUNCIÓN DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS

Crane estableció su modelo considerando los datos pluviométricos de Estados Unidos de Norteamérica e información global general. Para su aplicación, determinó un mapa con 8 regiones climáticas (Fig. 5.3) y, en especial ciertas subdivisiones para los Estados Unidos de Norteamérica y Europa. Para México sólo se cuenta con un mapa general aproximado y tal vez es conveniente subdividir aún más las regiones: templada y subtropical con climas continental, seco, árido y moderado, así como realizar estadísticas pluviométricas en las zonas de interés.

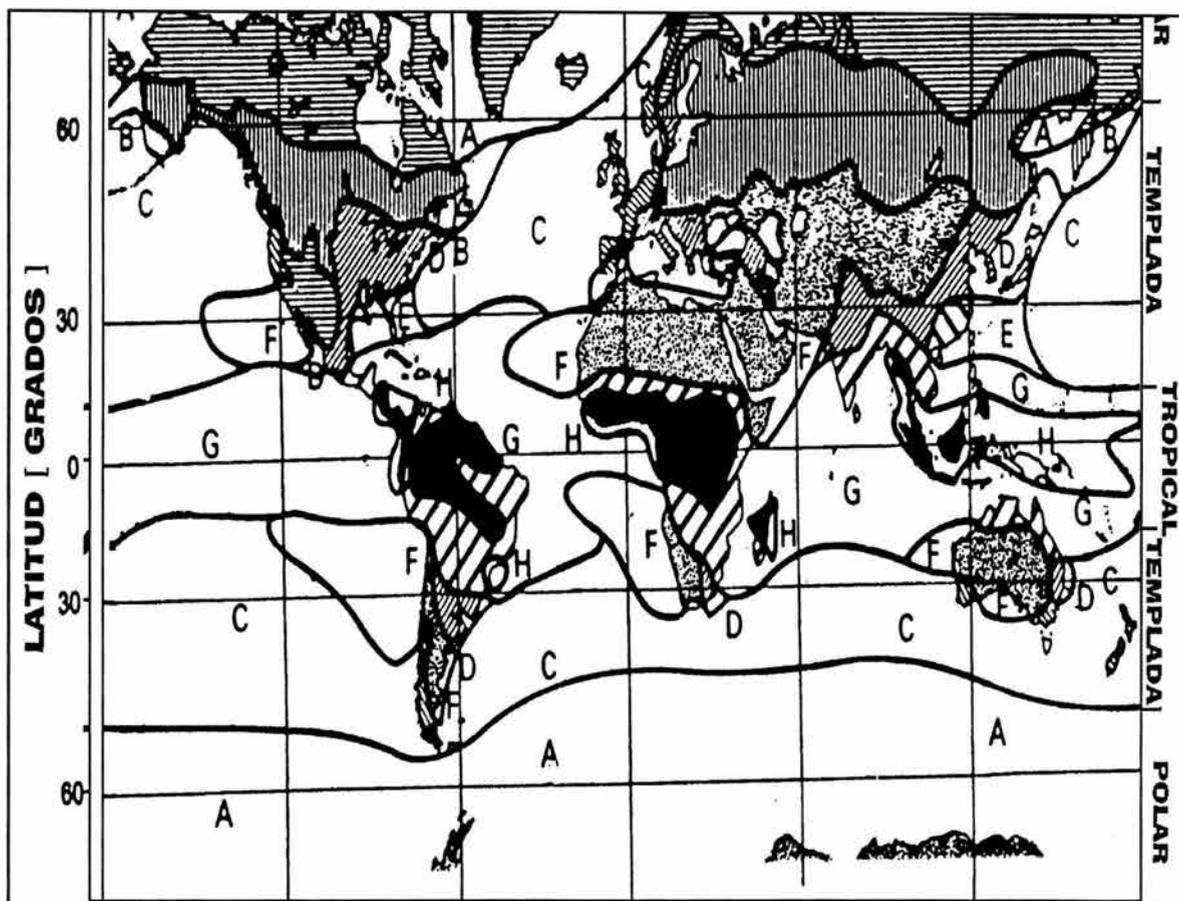


FIGURA 5.3 LLUVIA ACUMULADA POR REGIONES

El modelo considera como punto de partida del cálculo, la expresión empírica que permite obtener la atenuación por lluvia en los enlaces terrestres de microondas:

αR_p^β , donde:

$$\alpha = G_a f^{E_a}$$

$$\beta = G_b f^{E_b}$$

En estas dos últimas expresiones, el valor de los coeficientes y exponentes, está en función de la frecuencia y de la temperatura de la lluvia, mismos que se han determinado experimentalmente y a continuación se muestran:

RANGO DE FRECUENCIAS	G_i	E_i
$2.9 \leq f \leq 54 \text{ GHz}$	4.21×10^{-5}	2.42
$8.5 \leq f \leq 25 \text{ GHz}$	1.41	- 0.0779
$2.5 \leq f \leq 164 \text{ GHz}$	4.63	- 0.272

PASOS PARA APLICAR EL MODELO DE CRANE

1.- Reunir los datos de entrada al modelo:

a) Ubicación de la estación: Latitud (grados), altura sobre el nivel del mar (km), ángulo de elevación (grados), frecuencia de operación (GHz) y disponibilidad deseada en el enlace.

2.- Calcular la probabilidad de ocurrencia de lluvia excedida:

$p = 100 \% - \text{disponibilidad deseada.}$

Las disponibilidades más empleadas o típicas son: 99%, 99.9%, 99.99%, y 99.999%.

3.- Para el valor de probabilidad correspondiente al exceso de lluvia asociado a la disponibilidad requerida y la región climática de la estación, se consultan los datos pluviométricos disponibles del lugar.

En caso de no existir estadísticas, se usa una aproximación con la información correspondiente a la Fig. 5.3 y se determina el valor R_p .

4.- A continuación se determina la altura de la isoterma de cero grados a partir de la probabilidad y latitud de la estación (una aproximación se da en la Fig. 5.2).

5.- Se calcula la proyección horizontal de la distancia al satélite:

$$D = \frac{H(P) - Alt_{est. terr}}{\tan \theta}$$

donde :

$H(P)$ = altura de la isoterma de 0°

θ = ángulo con que la antena apunta al satélite

En latitudes donde el ángulo con que apunta la antena al satélite es menor de 10 grados, debe considerarse un cambio en la distancia debido a la curvatura de la tierra, que se calcula con la fórmula siguiente, considerando un radio promedio de la tierra de 8500 km.:

$$D = R \bullet \arcsin \left[\left(\frac{\cos \theta}{H(p) + R} \right) \bullet \left(L - (Alt_{est} + R) \bullet \sin \theta \right) \right]$$

donde :

$$L = \sqrt{(Alt_{est} + R)^2 \sin^2 \theta + 2(R \bullet H(p) - Alt_{est}) + [H(p)]^2 - Alt_{est}^2}$$

6.- Obtenida la tasa o densidad de lluvia en la región de interés, se determina el margen de atenuación del enlace. Para la atenuación vertical se considera que R_p es constante desde la superficie hasta la altura de la isoterma. Los cálculos parten de la expresión general siguiente:

$$A(R_p, D) = \frac{\alpha R_p^\beta}{\cos \theta} \left[\frac{e^{u\beta d} - 1}{u\beta} - \frac{b^\beta e^{c\beta d}}{c\beta} + \frac{b^\beta e^{c\beta D}}{c\beta} \right] \quad d \leq D \leq D_o$$

$A(R_p, D)$ = Atenuación

D = distancia en la trayectoria

Los casos particulares que se tienen son:

a) Si $0 < D < d$:

$$A(p) = \frac{\alpha R_p^\beta}{\cos\theta} \left[\frac{e^{u\beta d} - 1}{u\beta} \right]$$

b) Si $d < D < 22.5$:

$$A(p) = \frac{\alpha R_p^\beta}{\cos\theta} \left[\frac{e^{u\beta d} - 1}{u\beta} - \frac{b^\beta e^{c\beta d}}{c\beta} + \frac{b^\beta e^{c\beta D}}{c\beta} \right]$$

c) Si $D > 22.5$: , se emplea la expresión previa recalculando la tasa de lluvia (R'_p en lugar de R_p), con la siguiente modificación a la probabilidad de lluvia en exceso:

$$p' = p \left[\frac{22.5}{D} \right]$$

7.- Se estima el sesgo de los límites superior e inferior del margen de atenuación del enlace, es decir las desviaciones estándar de lo obtenido), con base en lo siguiente:

Porcentaje del año	(%) de la desviación st.
1.0	39
0.1	32
0.01	32
0.001	39

Por ejemplo un margen estimado de 12 dB con el 0.01 % de lluvia excedida al año debe tomar límites superior/inferior de

$$(12)(32) = \pm 3.84\% .$$

Para trayectorias inclinadas la fórmula para el cálculo de la atenuación es:

$$A_s = \frac{LA(R_p, D)}{D} = \frac{A(R_p, D)}{\cos(\theta)}; \quad \theta \geq 10^\circ$$

En dichos cálculos se emplean los parámetros empíricos siguientes:

$$b = 2.3 R_p^{-0.17}$$

$$c = 0.0026 - 0.03 \ln R_p$$

$$d = 3.8 - 0.6 \ln R_p$$

$$u = \frac{\ln[b e^{cd}]}{d}$$

5.2 MODELO CCIR

PASOS PARA APLICAR EL MODELO

Este modelo emplea la altura de la isoterma de cero grados, en donde se produce la lluvia, la tasa de lluvia del lugar para la disponibilidad deseada, por ejemplo 99.99% ($R_{0.001}$), la altura sobre el nivel del mar (h_o) de la estación, el ángulo de elevación de la antena que apunta al satélite, la latitud de la estación terrena y la frecuencia con que se transmite.

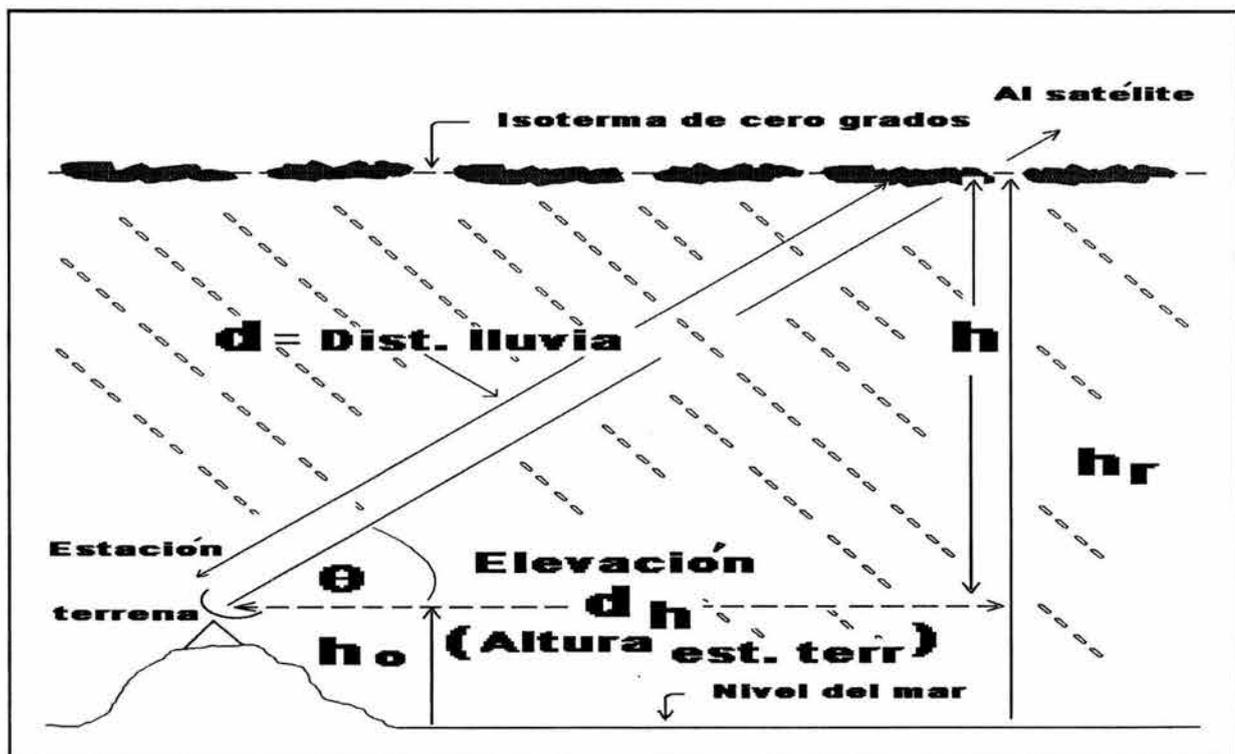


FIGURA 5.4 PARÁMETROS PARA EL MODELO CCIR

Este método ha sido presentado en tres variantes:

Método I para climas marítimos.

Método I' para climas tropicales.

Método II para climas continentales y/o porcentajes de disponibilidades mayores de 0.01%.

Algunos de los métodos anteriores han sido modificados con el transcurrir del tiempo, en este texto sólo se verá el primero de ellos en sus versiones utilizadas en 1986 y en 1990.

5.3.1 MÉTODO I (1986, disponibilidad 99.99 o lluvia en exceso del 0.01)

1.- Dada la latitud de la estación terrena en grados ($\theta_{\text{latitud}_{ET}}$), se calcula la altura h_r con la fórmula:

$$h_r = 5.1 - 2.15 \log \left[1 + 10^{\left(\theta_{\text{latitud}_{ET}} - \frac{27}{25} \right)} \right] \dots\dots\dots [km]$$

2.- Se calcula ahora la distancia de la estación a la isoterma en las nubes, en la dirección en la que apunta la antena al satélite : θ .

$$d = L_s = \frac{2(h_r - h_o)}{\sin(\theta) + \sqrt{\text{sen}^2 \theta + \frac{2(h_r - h_o)}{R_e}}} [km] \dots\dots\dots \theta < 10^\circ$$

$R_e =$ radio promedio de la tierra ≈ 8500 km.

$$d = L_s = \frac{h_r - h_o}{\text{sen} \theta} [km] \dots\dots\dots \theta \geq 10^\circ$$

$h_o =$ altura de la estación sobre el nivel del mar

3.- Se obtiene la proyección horizontal de la trayectoria inclinada de la señal:

$$L_G = L_s \cos \theta$$

4.- Ahora se considera que la lluvia no es uniforme a lo largo del trayecto y, se introduce un factor de corrección de la distancia calculada en el paso anterior para una disponibilidad del 99.99%, dado por:

$$r_p = \frac{90}{90 + 4L_G}$$

4.- Se obtiene el valor del coeficiente específico de atenuación a partir del nomograma publicado por la CCIR, o por fórmulas, :

$$\gamma = a R_{0.01}^b \quad \left[\frac{dB}{km} \right]$$

Los valores a , b , han sido calculados y tabulados por la CCIR, con base en el modelo de distribución del tamaño de las gotas de lluvia de Lawws y Parsons, que considera que la señal se propaga dependiendo de su polarización y sobre todo de su frecuencia. Para la polarización circular los coeficientes a emplear son:

$$a_c = \frac{a_h + a_v}{2}$$

$$b_c = \frac{a_h b_h + a_v b_v}{2 a_c}$$

5.- Por último, se calcula la atenuación por lluvia con:

$$A_{0.01} = L_{lluvia} = (\gamma) \times (L_s) \times (r_p) \quad [dB]$$

6.- Para calcular otros porcentajes excedidos de lluvia o disponibilidades (100% - p), se modifica la ecuación anterior como se indica a continuación:

$$A_{0.01} = L_{lluvia_p} = \left\{ \begin{array}{ll} A_{0.01} \left(\frac{p}{0.001} \right)^{-0.33} & 0.001 \leq p \leq 0.01 \\ A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-0.41} & 0.01 < p \leq 0.1 \end{array} \right\}$$

5.3.2 MÉTODO I (1990, disponibilidad 99.99 o lluvia en exceso del 0.01)

1.- Dada la latitud de la estación terrena en grados ($\theta_{\text{latitud}_{ET}}$), se calcula la altura h_r con la fórmula:

$$h_r = 3.0 + 0.028(\theta_{\text{latitud}_{ET}}) \quad 0^\circ \leq \theta_{\text{latitud}_{ET}} < 36^\circ$$

$$h_r = 4 - 0.075(\theta_{\text{latitud}_{ET}} - 36) \quad \theta_{\text{latitud}_{ET}} > 36^\circ$$

2.- Se calcula ahora la distancia de la estación a la isoterma en las nubes, en la dirección en la que apunta la antena al satélite: θ .

$$d = L_s = \frac{2(h_r - h_o)}{\sin(\theta) + \sqrt{\text{sen}^2 \theta + \frac{2(h_r - h_o)}{R_e}}} \quad [\text{km}] \dots \theta < 10^\circ$$

$R_e =$ radio promedio de la tierra ≈ 8500 km.

$$d = L_s = \frac{h_r - h_o}{\text{sen} \theta} \quad [\text{km}] \dots \theta \geq 10^\circ$$

$h_o =$ altura de la estación sobre el nivel del mar

3.- Ahora se introduce un factor de corrección que considera que la lluvia no es uniforme a lo largo del trayecto y, que debe ajustarse la distancia oblicua hacia el satélite:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + \left[\frac{d}{35 e^{-0.015 R_{0.01}}} \right] \cos \theta}$$

donde:

$R_{0.01} =$ lluvia en exceso en una región dada

4.- Se obtiene el valor del coeficiente específico de atenuación a partir del nomograma publicado por la CCIR, o por fórmulas, :

$$\gamma = a R_{0.01}^b \quad \left[\frac{dB}{km} \right]$$

Los valores a, b, han sido calculados y tabulados por la CCIR, con base en el modelo de distribución del tamaño de las gotas de lluvia de Lawws y Parsons, que considera que la señal se propaga dependiendo de su polarización y sobre todo de su frecuencia. Para la polarización circular los coeficientes a emplear son:

$$a_c = \frac{a_h + a_v}{2}$$

$$b_c = \frac{a_h b_h + a_v b_v}{2 a_c}$$

5.- Por último, se calcula la atenuación por lluvia con:

$$A_{0.01} = L_{lluvia} = (\gamma) \times (L_s) \times (r_{0.01}) \quad [dB]$$

6.- Para calcular otros porcentajes excedidos de lluvia o disponibilidades (100% - p), se utiliza la ecuación:

$$A_{lluvia_p} = L_{lluvia_p} = L_{lluvia_{0.01}} \left[0.12 p^{-(0.546 + 0.043 \log p)} \right]$$

5.3 MODELO SAM

PASOS PARA APLICAR EL MODELO

Este modelo, desarrollado por la NASA, considera la altura efectiva de la tormenta (H_e) en función de la altura de la isoterma de cero grados (H_i , en donde se produce la lluvia), a partir de la altura en que se encuentra la estación terrena, para una tasa de lluvia R .

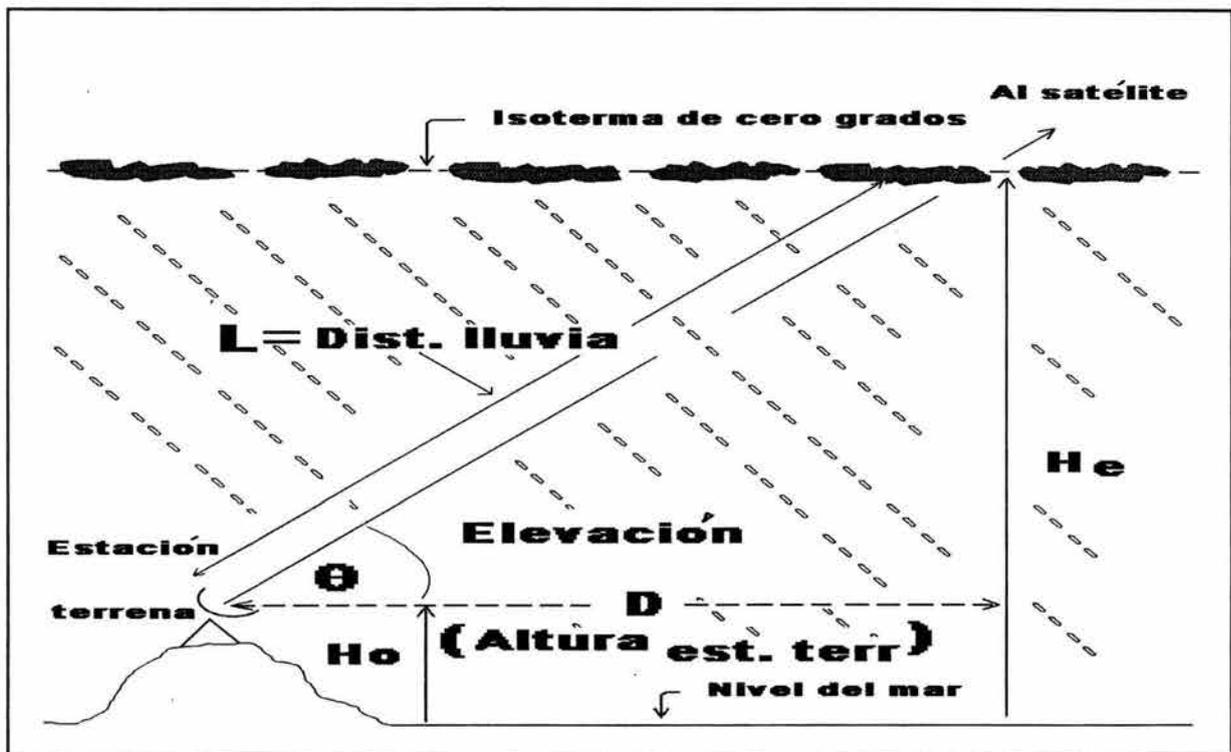


FIGURA 5.5 PARÁMETROS PARA EL MODELO SAM

1.- Dado el ángulo de elevación de la antena que apunta al satélite, la latitud y altura sobre el nivel del mar de la estación terrena, se determina la altura de la isoterma de cero grados con las fórmulas:

$$H_i = 4.8 \dots\dots\dots [km] \quad 0^\circ < \theta_{LAT_{ET}} < 30^\circ$$

$$H_i = 7.8 - 0.1 \times (\theta_{LAT_{ET}}) \dots\dots [km] \quad \theta_{LAT_{ET}} > 30^\circ$$

2.- A continuación se calcula la altura efectiva de la tormenta,

considerando la tasa de lluvia

$$H_e = H_i = 4.8 \dots\dots\dots [km] \quad R \leq 10 \text{ mm/hr}$$

$$H_e = H_i + \log_{10}\left(\frac{R}{10}\right) \dots\dots [km] \quad R > 10 \text{ mm/hr}$$

3.- Ahora se calcula la distancia en la trayectoria de la lluvia, en función del ángulo de elevación con que la antena apunta al satélite, la altura efectiva de la tormenta H_e y la altitud sobre el nivel del mar en que se encuentra la estación:

$$L = \frac{H_e - H_o}{\text{sen}(\theta_{\text{antena}_{ET}})}$$

4.- Por último se calcula la atenuación:

$$A(P) = a R(P)^b L \quad \text{cuando } R \leq 10 \left[\frac{mm}{hr} \right]$$

$$A(P) = [a R(P)^b] \bullet \frac{\left[1 - e^{-\left(\frac{1}{22}\right) b \log_e \left(\frac{R(P)}{10}\right) L \cos(\theta_{\text{antena}_{ET}})} \right]}{\left[\left(\frac{1}{22}\right) b \log_e \left(\frac{R(P)}{10}\right) \cos(\theta_{\text{antena}_{ET}}) \right]}$$

$$\text{cuando } R > 10 \left[\frac{mm}{hr} \right]$$

Los valores a , b , han sido calculados y tabulados por la CCIR, con base en el modelo de distribución del tamaño de las gotas de lluvia de Lawms y Parsons, que considera que la capacidad de la señal para propagarse en un medio dado, depende de su polarización y, sobre todo, de su frecuencia: De manera suficientemente aproximada, pueden obtenerse sus valores mediante las fórmulas dadas en la siguiente tabla:

a	$4.21 \times 10^{-5} \times f^{2.42}$	$2.9 \leq f \leq 54$ [GHz]
	$1.42 \times 10^{-2} \times f^{-0.699}$	$54 \leq f \leq 180$ [GHz]
b	$1.41 \times f^{-0.0779}$	$8.5 \leq f \leq 25$ [GHz]
	$2.63 \times f^{-0.272}$	$25 \leq f \leq 164$ [GHz]

5.4 MODELO DAH

PASOS PARA APLICAR EL MODELO

Este modelo, desarrollado por Disyanake y asociados especialmente para frecuencias de banda Ka, considera la altura de la isoterma de cero grados, la tasa de lluvia del lugar ($R_{0.01}$); la disponibilidad deseada, por ejemplo 99.99%, la cual implica la probabilidad de lluvia $p = 0.01$, la altura de la estación a la isoterma (h_r), así como la altura sobre el nivel del mar (h_o), el ángulo de elevación de la antena que apunta al satélite (θ), la latitud de la estación terrena (ϕ) y, por último, la frecuencia y polarización con que se transmite.

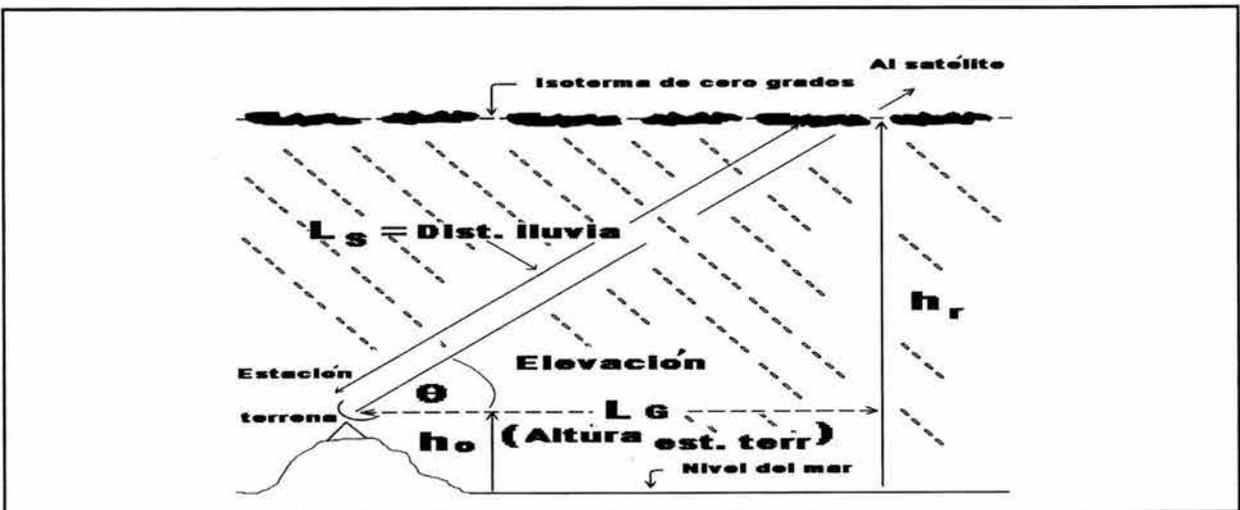


FIGURA 5.6 PARÁMETROS PARA EL MODELO DAH

1.- Dada la latitud de la estación terrena en grados (ϕ), se calcula la altura h_o con las fórmulas:

$$h_r = 5 \text{ [km]} \quad 0^\circ \leq \phi < 23^\circ$$

$$h_r = 5 - 0.075[\phi - 23^\circ] \text{ [km]} \quad \phi > 23^\circ$$

2.- A continuación la distancia de la estación a la isoterma en las nubes, en la dirección en la que apunta la antena al satélite: θ .

$$L_s = \frac{(h_r - h_o)}{\sin(\theta)} \text{ [km]}$$

$$R_e = \text{radio efectivo de la tierra} \approx 8500 \text{ km.}$$

3.- Se obtiene la proyección horizontal de la trayectoria inclinada de la señal:

$$L_G = L_s \cos \theta$$

4.- Se obtiene el valor del coeficiente específico de atenuación a partir del nomograma publicado por la CCIR, o por fórmulas, :

$$\gamma = a R_{0.01}^b \quad \left[\frac{dB}{km} \right]$$

Para la polarización circular los coeficientes a emplear son:

$$a_c = \frac{a_h + b_v}{2} \quad b_c = \frac{a_h b_h + a_v b_v}{2 a_c}$$

5.- Se calcula el factor horizontal de proporcionalidad:

$$rh_{0.01} = \frac{1}{1.0 + 0.78 \times \sqrt{\left(\frac{\gamma \times L_G}{f}\right)} - 0.38 \times [1.0 - 10.0^{-2L_G}]} \quad [dB]$$

6.- Se corrige la distancia oblicua al satélite:

$$L_r = \frac{L_G(rh_{0.01})}{\cos(\theta)} \quad [km] \quad \text{para } \tau > \theta$$

$$L_r = \frac{L_G(rh_{0.01})}{\sin(\theta)} \quad [km] \quad \text{para } \tau \leq \theta$$

donde:

$$\tau = \frac{(h_r - h_o)}{L_G(rh_{0.01})}$$

7.- Se calcula el factor vertical de proporcionalidad:

$$rh_{0.01} = \frac{1}{1.0 + \sqrt{\sin(\theta)} \left[-0.45 + \left[31.0 (1.0 - e^{\frac{\theta}{1+x}}) \right] \sqrt{\left(\frac{\gamma x L_G}{f^2} \right)} \right]}$$

$$x = 36^\circ - |\phi| \quad \text{para } |\phi| < 36^\circ$$

$$x = 0^\circ \quad \text{para } |\phi| \geq 36^\circ$$

8.- Se calcula la distancia efectiva de la señal a través de la lluvia:

$$L_e = L_r (rv_{0.01})$$

9.- Para la probabilidad específica $p = 0.01 \%$, la atenuación es:

$$A_{0.01} = \gamma L_e \quad [dB]$$

10.- Para calcular otros porcentajes excedidos de lluvia o disponibilidades ($100\% - p$), se modifica la ecuación anterior como se indica a continuación:

$$A_p = A_{0.01} \left[\frac{p}{0.01} \right]^{(-10.655 + 0.033 \ln p - 0.045 \ln A_{0.01} - z \sin(\theta [1.0 - p]))}$$

donde:

para $p \geq 1\%$ $z = 0$;

para $p < 1\%$

$$\left\{ \begin{array}{l} z = 0 \quad \phi \geq 36^\circ \\ z = -0.005 [|\phi| - 36^\circ] \quad \theta \geq 25^\circ \text{ y } |\phi| < 36^\circ \\ z = -0.005 (|\phi| - 36^\circ) + 1.8 - \sin(\theta) \\ \quad \theta < 25^\circ \text{ y } |\phi| < 36^\circ \end{array} \right\}$$

5.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS PARA BANDA Ku CON ALGUNOS MODELOS

5.5.1 CÁLCULO PRÁCTICO CON EL MODELO DE CRANE

Considerando la estación terrena instalada en el edificio Valdés Vallejo, en Ciudad Universitaria, MéxicoD.F., ($\theta_{\text{latitud}_{ET}} = 19.4^\circ$), a una altura sobre el nivel del mar $h_r = 2.24$ km., con una tasa de precipitación del lugar estimada por Crane en 82 mm/hr.; transmitiendo con una frecuencia de 14.06975 GHz, polarización vertical, y una disponibilidad deseada del 99.99% se tiene:

1.- Cálculo de la probabilidad de ocurrencia de lluvia excedida:

$$p = 100\% - \text{disponibilidad deseada} = 0.01\%$$

2.- La altura de la isoterma de cero grados a partir de la probabilidad y latitud de la estación:

A partir de la gráfica elaborada por Crane, $h_r \approx 5.3$ km.,

3.- La proyección horizontal de la distancia con lluvia al satélite:

$$D = \frac{(5.3 - 2.24)}{\tan(59.2^\circ)} \approx 1.7939 \text{ [km.]}$$

4.- En este caso se tiene que:

$$\begin{aligned} d &= 3.8 - 0.6 \ln R_p = 3.8 - (0.6) \ln(82) = \\ &= 3.8 - (0.6)(4.4067) \approx 1.156 \end{aligned}$$

De acuerdo a la relación $d < D < 22.5$:

$$1.156 < 1.7939 < 22.5$$

La fórmula a emplear es:

$$A(R_p, D) = \frac{\alpha R_p^\beta}{\cos\theta} \left[\frac{e^{u\beta d} - 1}{u\beta} - \frac{b^\beta e^{c\beta d}}{c\beta} + \frac{b^\beta e^{c\beta D}}{c\beta} \right]$$

Calculando por partes:

$$C1 = \frac{\alpha R_p^\beta}{\cos\theta} = \frac{(0.0253) * (82)^{1.1475}}{\cos(59.2^\circ)} = \frac{(0.0253)(157.1)}{0.505733} \approx 7.8594$$

$$C2 = \frac{e^{u\beta d} - 1}{u\beta} = \frac{e^{(-0.03374)(1.1475)(1.156)} - 1}{(-0.03374)(1.1475)} \approx 1.1305$$

$$C3 = \frac{b^\beta e^{c\beta d}}{c\beta} = \frac{(1.0874)^{1.1475} e^{(-0.1062)(1.1475)(1.156)}}{(-0.1062)(1.1475)} \approx -7.8463$$

$$C4 = \frac{b^\beta e^{c\beta D}}{c\beta} = \frac{(1.0874)^{1.1475} e^{(-0.1062)(1.1475)(1.7939)}}{(-0.1062)(1.1475)} \approx -7.2594$$

Substituyendo:

$$\begin{aligned} A(R_p, D) &= 7.8594 [1.13048 - (-7.8463) + (-7.2594)] \\ &\approx 13.4974 \text{ [dB]} \end{aligned}$$

5.5.2 CÁLCULO PRÁCTICO CON EL MODELO CCIR DE 1990

Considerando la estación terrena instalada en el edificio Valdés Vallejo ($\theta_{\text{latitud}_{ET}} = 19.4^\circ$, $\theta_{\text{long}_{ET}} = 99.15^\circ$, $\theta_{\text{elev}_{antena}} \approx 59.6^\circ$) y altura sobre el nivel del mar $h_r = 2.24$ km., así como la tasa de precipitación del lugar = 82 mm/hr. (según Crane), con una frecuencia de transmisión de 14.06975 GHz, polarización vertical, se tiene:

1.- La altura h_r resulta:

$$h_r = 3 - 0.028 \times (19.4) \approx 3.5432 \text{ km} \quad \text{pues } 19.4 < 36^\circ$$

2.- La distancia de la estación a la isoterma en las nubes, en la dirección en la que apunta la antena al satélite.

$$L_s = \frac{(3.5432 - 2.24)}{\text{sen } 59.62} \approx 1.5109 \text{ km} \quad \theta > 5^\circ$$

$$\theta = \theta_{\text{elev}_{antena}} = \text{ángulo de elevación de la antena apuntando al satélite}$$

3.- El factor de reducción de la trayectoria:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + \left[\frac{1.5109}{35 e^{-0.015 \times 82}} \right] \cos(59.62)} \approx 0.93046$$

$$R_{0.01} = \text{intensidad de lluvia excedida 0.01\% en un año} \\ \approx \left[82 \frac{\text{mm}}{\text{hr}} \text{ en el DF} \right]$$

4.- Con base en la tasa de precipitación, frecuencia y polarización, se obtienen los valores a, b, a partir del nomograma o mediante fórmulas, por consiguiente el coeficiente de atenuación es:

$$Y_R = a R_{0.01}^b = 0.0253 \times \left[R_{0.01}^{1.1475} \right] \approx 3.9748 \left[\frac{dB}{km} \right]$$

5.- Por último, la atenuación por lluvia considerando la trayectoria inclinada:

$$A_{0.01} = (3.9748) \times (1.5109) \times (0.03046) \approx 5.588 \text{ [dB]}$$

6.- Para obtener los diferentes porcentajes de disponibilidad del servicio:

$$A_p = A_{0.001} \times \left[0.12 p^{- (0.546 + 0.043 \log p)} \right] \text{ [dB]}$$

5.5.3 CÁLCULO PRÁCTICO CON EL MODELO SAM

Con los mismos datos del cálculo anterior, éste modelo considera una mayor altura efectiva de la tormenta (Hr), al ubicar más alto la isoterma de cero grados (Hi, en donde se produce la lluvia), partiendo de la altura en que se encuentra la estación terrena, para la tasa de lluvia R.

1.- La altura de la isoterma de cero grados con la fórmula:

$$H_i = 4.8 \text{ [km]} \quad \theta_{LAT_{ET}} = 19.4 < 30^\circ$$

2.- La altura efectiva de la tormenta, considerando la tasa de lluvia:

$$H_e = 4.8 + \log_{10}\left(\frac{82}{10}\right) \approx 5.7138 \text{ [km]} \quad R > 10 \text{ mm/hr}$$

3.- La distancia en la trayectoria de la lluvia, en función del ángulo de elevación de la antena que apunta al satélite, y las altura mencionadas previamente en donde se encuentra la estación:

$$L_s = \frac{5.7138 - 2.24}{\text{sen}(59.62)} \approx 4.02755 \text{ [km]}$$

4.- Por consiguiente la atenuación es:

$$A(P) \approx \left[0.0253 \times 82^{1.1475} \right] \bullet \frac{\left[1 - e^{- (1/22) (1.14754) \log_e \left(\frac{82}{10} \right) (4.02755) \cos(59.62)} \right]}{\left[(1/22) \times 1.1475 \times \log_e \left(\frac{82}{10} \right) \right] \cos(59.62)}$$

$$\approx 14.3445 \quad [dB] \quad \text{cuando } R = 82 \left[\frac{mm}{hr} \right]$$

5.5.4 CÁLCULO PRÁCTICO CON EL MODELO DAH

Consideraremos los mismos datos indicados al inicio: la lluvia del lugar ($R_{0.01} = 82 \text{ mm/h}$); la disponibilidad deseada = 99.99%, la cual implica la probabilidad de lluvia $p = 0.01$, la altura de la estación a la isoterma (h_r) en función de la latitud (ϕ), la altura sobre el nivel del mar ($h_o = 2.24 \text{ km.}$), el ángulo de elevación de la antena que apunta al satélite ($\theta = 59.62^\circ$) y, por último, que se transmite a 14.06975 GHz, con polarización vertical.

1.- Dada la latitud de la estación terrena en grados ($\phi = 19.4^\circ$), la altura h_r es:

$$h_r = 5 \dots\dots\dots [km] \quad 0^\circ \leq \phi < 23^\circ$$

2.- La distancia de la estación a la isoterma en las nubes, en la dirección en la que apunta la antena al satélite:

$$L_s = \frac{(5 - 2.24)}{\sin(59.62^\circ)} \approx 3.199 \quad [km]$$

3.- La proyección horizontal de la trayectoria inclinada de la señal:

$$L_G = L_s \cos \theta = 3.199 \times \cos(59.62) \approx 1.618 \quad [km]$$

4.- El valor del coeficiente específico de atenuación a partir del nomograma publicado por la CCIR, o por fórmulas, :

$$\gamma = a R_{0.01}^b = 0.025301 \times 82^{1.1475} \approx 3.9748 \left[\frac{dB}{km} \right]$$

5.- El factor horizontal de proporcionalidad:

$$rh_{0.01} = \frac{1}{1.0 + 0.78 \sqrt{\left(\frac{(1.618)(3.9748)}{14.06975} \right) - 0.38 [1.0 - 10.0^{-2(1.618)}]}} \approx 0.8714 [dB]$$

6.- La corrección de la distancia oblicua al satélite:

$$L_r = \frac{1.618(0.8714)}{\cos(59.62)} \approx 3.1993 [km] \quad \text{para } \tau \approx 62.94 > 59.62$$

donde:

$$\tau = \frac{(5.0 - 2.24)}{1.618(0.8714)} \approx 62.94 [km]$$

7.- El factor vertical de proporcionalidad:

$$x = 36^\circ - |19.4| = 16.6 \quad \text{para } |\phi| < 36^\circ$$

$$d1 = \left[-0.45 + \left[31.0 \left(1 - e^{\frac{-59.62}{1 + 16.6}} \right) \right] \frac{\sqrt{(3.199)(3.9748)}}{14.06975^2} \right] \approx 0.0896$$

$$rv_{0.01} = \frac{1}{1.0 + \left[\sqrt{\sin(59.62)} \right] x [0.0896]} \approx 0.9283$$

8.- Se calcula la distancia efectiva de la señal a través de la lluvia:

$$L_e = L_r (rv_{0.01}) = (3.199)(0.9283) \approx 2.9698 [km]$$

9.- Para la probabilidad específica $p = 0.01$ %, la atenuación es:

$$A_{0.01} = \gamma L_e = (3.9748)(2.9698) \approx 11.8044 [dB]$$

5.5.5 TABLA RESUMEN, CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

A continuación se resume los resultados obtenidos con la siguiente tabla:

TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS		
MODELO	ATENUACIÓN	DATOS GENERALES
CRANE	13.4974 dB	FRECUCENCIA 14.06975 GHz POLARIZACIÓN VERTICAL R = 82 mm/hr
SAM	14.3445 dB	
CCIR	5.588 dB	FRECUCENCIA 14.06975 GHz POLARIZACIÓN VERTICAL R = 82 mm/hr
DAH	11.8044 dB	

Observamos que los modelos de Crane y SAM sobreestiman el valor de atenuación. En particular el SAM pues considera una mayor altura para la isoterma, y su estimación obviamente aumenta.

$$\text{Crane: } A(R_p, D) \approx 13.4974 \text{ [dB]}$$

$$\text{Sam: } A(P) \approx 14.3445 \text{ [dB]} \quad \text{cuando } R = 82 \left[\frac{\text{mm}}{\text{hr}} \right]$$

El modelo DAH ubica su estimación del valor de atenuación por lluvia ligeramente abajo de SAM y de Crane.

El modelo CCIR se acerca más al valor estimado por Satmex para la ciudad de México (4.2 dB).

$$\text{CCIR: } A_{0.01} \approx 5.588 \text{ [dB]}$$

La altura de 2.24 km sobre el nivel del mar de la ciudad de México, confiere características específicas a la isoterma de 0° con respecto a otros lugares, precisamente por la ubicación y características del lugar. Tal vez es conveniente reconsiderar las fórmulas que permiten

calcular la altura de la isoterma, incluyendo variables tales como época del año, presión, altura/latitud o, al menos, determinar estadísticamente su altura para aplicarla en los modelos y obtener resultados más cercanos a la realidad. Otro punto interesante sería incluir ciertos valores de los diagramas termométricos de las capas atmosféricas y generar un modelo propio de las zonas de México.

CONCLUSIONES

Para validar, rechazar o modificar los modelos y sus resultados, es necesario contar con mediciones reales, efectuadas en los casos de lluvia de las regiones de interés, pues no es totalmente válida la extrapolación con base en estadísticas de otros lugares.

Aún más, para investigación académica, sería conveniente contar con equipo de radar, que permitiese la observación de la estructura espacial de la lluvia y, realizar mediciones estadísticas para establecer las características específicas de la lluvia en la Ciudad de México y otros lugares de la república, sobre todo en el sureste, donde la tecnología satelital puede ayudar al desarrollo de las redes de provincia.

Con la teoría expuesta, se concluye que el tipo de lluvia y su cantidad varía según la región de interés y época del año, de ahí que es necesario recopilar datos estadísticos propios de cada región. Aún así, la intensidad de la lluvia varía en un mismo lugar año con año y deben considerarse suficientes datos acumulados para poder predecir la precipitación pluvial en un momento dado pues la distribución de la cantidad de lluvia no es uniforme en un área de interés ni por altura ni por duración del fenómeno.

Por consiguiente se recomienda:

Recopilar datos sobre precipitación pluvial en cada una de las regiones, por lo menos en un par de años.

Calcular la atenuación con al menos tres modelos y comparar los resultados con mediciones reales de atenuación de las señales para elegir el modelo más adecuado por región pues se postula que la validez de un modelo depende de las condiciones de la zona. Es decir, posiblemente es mejor un modelo dado en zonas del norte del país, otro en la zona centro y otro más en la zona sur.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS TEÓRICO DEL ENLACE CON EL SATÉLITE GEOESTACIONARIO

6.1 ETAPAS GENERALES PARA EL DISEÑO DEL ENLACE

Para instalar cada una de las estaciones terrenas de una red vía satélite, se sugiere como metodología de diseño:

- a) Establecer el ancho de banda necesario para transmitir la información: datos, video, etc, con ello se selecciona las posibles bandas y se averigua su disponibilidad de uso en la SCT.
- b) En caso de existir la posibilidad de instalación en diversos lugares, se selecciona aquel que reúne las mejores características: fácil acceso, libre al máximo de posibles interferencias y obstáculos; de ser posible en clima lo más árido y que cuente con algún medio de comunicación como puede ser la línea telefónica o radiotransmisor.
- c) Una vez determinado lo anterior se fija la disponibilidad requerida del servicio, por ejemplo el 99.99 % anual y el BER necesario (por ejemplo en el caso de los bancos, es deseable el menor BER posible). Además se establece la potencia de transmisión de acuerdo a las sugerencias que normalmente da SATMEX, y con ello el modelo del posible transmisor (los modelos típicos comerciales de transmisores son de 1, 2, 5, 10, 20 watts, etc.) y un diámetro tentativo para la antena parabólica (los diámetros comerciales típicos son de 0.6, 0.67, 0.76, 0.84, 0.92, 0.95, 0.98, 1, 1.2, 1.8, 2.4, 3, 3.4, 3.7, 3.8 m, etc.), así como la temperatura de ruido del sistema incluida en el parámetro (G/T). Debe verificarse que los modems y multiplexores seleccionados sean compatibles entre sí en la red y que su tecnología sea lo más actualizada posible y adecuada al caso.
- d) Se procede a realizar el primer cálculo completo del enlace satelital para obtener la relación (C/N) para que soporte las atenuaciones e interferencias, tanto de subida como de bajada (indicadas en la fórmula dada al inicio de la siguiente página), para las regiones donde se instalarán los equipos:

$$(C/N)_{total} = 10 \log \left[\frac{1}{(C/N)_o + aI + aXP + aXS} \right]_{ASCENDENTE}$$

$$+ 10 \log \left[\frac{1}{(C/N)_o + aI + aXP + aXS} \right]_{DESCENDENTE}$$

El resultado que se obtenga con dicha expresión, se compara con el resultado que se obtenga de la relación (C/N) que considere la energía de los bits de la información, la velocidad a que se transmiten y el ancho de banda que emplean (requerida), indicados en la fórmula dada a continuación:

$$(C/N)_{REQ.} = (Eb/N_o) - 10 \log(\text{Velocidad}_{información}) - 10 \log(BW_{empleado})$$

la diferencia que se obtenga será el **MARGEN** que se requiere sea al menos cero o positivo para indicar que el enlace es adecuado, esto es:

$$MARGEN_{ENLACE\ TOTAL} = (C/N)_{TOTAL} - (C/N)_{REQUERIDO}$$

Si el resultado es negativo, no corresponde a la tasa de bits erróneos previstos en el diseño del enlace satelital y deberá modificarse algún parámetro como:

- el diámetro de la antena,
- la potencia o
- buscar componentes que permitan bajar la temperatura del sistema,

hasta que se cumpla con las características del diseño planteado; si el MARGEN está excedido, podrá reducirse la potencia y recalcular hasta lograr el valor deseado. El margen considera que en un momento dado se sobrepasa la cantidad de lluvia en mm/h que estadísticamente ocurre en el lugar donde se instala una estación terrena y que el enlace podrá soportarlo.

No debe olvidarse que el diseño deberá considerar **los parámetros de tipo comercial más cercanos o aproximados al cálculo teórico.**

6.2 CONSIDERACIONES GENERALES DEL ENLACE

El objetivo del cálculo del enlace, es prever los requerimientos de potencia suficientes para asegurar la continuidad del enlace satelital durante todo el tiempo posible en un intervalo de tiempo dado (disponibilidad prefijada, por ejemplo 99.99% anual), es decir para que no se interrumpa en condiciones climatológicas adversas y eventuales reportadas dentro del comportamiento estadístico correspondiente, que por lo general debe observarse en una región o zona climática. Cuando se hace un buen diseño, la potencia es la óptima y considera cierto margen de potencia en reserva, que permite al enlace enfrentar a los problemas de atenuación inherentes a situaciones climáticas adversas cíclicas.

Dado que los factores climatológicos adversos son de naturaleza aleatoria, cíclica, y de duración y magnitud variable, generalmente se toman las siguientes previsiones:

- En enlaces con gran capacidad de tráfico (telepuertos) se incluye un sistema de realimentación que aumenta o disminuya automáticamente la potencia transmitida hacia el satélite.
- Para las estaciones en red satelital (generalmente con baja capacidad de tráfico) se consideran todas las atenuaciones de la señal (especialmente por lluvia) y el diámetro de la antena para que las señales de subida y bajada cumplan las relaciones de portadora/ruido que aseguran la calidad del enlace.

Para el cálculo del enlace el factor más importante es la potencia de la portadora que se transmite, en términos de una potencia isotrópica radiada efectiva (EIRP o PIRE) por antenas de tipo direccional como son las parábolas, esta es una potencia que depende de la dirección; dicha potencia es atenuada por desacoplamiento en la alimentación, inexacta alineación de antenas y por viajar tanto en la atmósfera como en el espacio libre, de ahí que deberá emplearse de forma óptima, enfrentando y superando también las intermodulaciones e interferencias que se presenten, de tal manera que el nivel de la señal supere esos problemas y al ruido presente en la etapa receptora.

6.3 CÁLCULOS PRELIMINARES: ACIMUT, ELEVACIÓN, Y DISTANCIA SATÉLITAL

Dado que la órbita de los satélites geoestacionarios está sobre el plano ecuatorial, en promedio a 35,786 km. de altura sobre el nivel del mar, el posicionamiento de la antena de una estación terrena hacia el satélite se lleva a cabo mediante los ángulos de acimut y de elevación, bajo las siguientes simplificaciones (ver Fig. 6.1):

a) la tierra es una esfera perfecta, acotada por latitudes y longitudes geográficas teóricas.

b) los radios de la órbita y de la tierra son:

$$R_{sat} \approx 42,164.2, \quad R_{tierra} \approx 6378.15 \text{ km.}$$

Los datos posicionales conocidos son los siguientes:

- la latitud y longitud de la estación terrena ($\theta_1 = \theta_{lat_{ET}}, \theta_{long_{ET}} = \theta_L$) y
- la longitud del satélite $\theta_{long_{SAT}} = \theta_s$.

6.3.1 ACIMUT

Con los datos anteriormente indicados, el acimut nos indica la dirección geográfica en la que se encuentra el satélite geoestacionario; éste ángulo se mide a partir del norte magnético, el resultado obtenido se modifica de acuerdo al hemisferio de la estación terrena y, por último, se toma en cuenta la declinación magnética del lugar de la estación. En la figura 6.1:

- el acimut es el ángulo que va del segmento \overline{TC} al segmento \overline{TX} , en donde se muestra la intersección del plano horizontal TCX con el plano vertical TSO.
- TCX es tangente a la superficie e intersecta al plano que contiene a la recta TS (de línea de vista entre antenas de estación y satélite), y con ella establecemos un plano perpendicular al plano horizontal, involucrando a la estación terrena, el centro de la tierra y el satélite (el ángulo entre las

recta que une la estación con el centro de la tierra y la recta que une el centro de la tierra y el satélite no puede medirse directamente y lo denominamos θ).

- El triángulo OCX está sobre el plano ecuatorial y el segmento \overline{OC} pasa por la longitud de la estación; el segmento \overline{OX} pasa por la longitud asociada al satélite.

A partir de la Figura 6.3 se tiene:

$$\overline{CX} = \overline{CO} \tan |\theta_s - \theta_L|; \quad \overline{CT} = R_{tierra} \tan(\theta_1); \quad \overline{CO} = \frac{R_{tierra}}{\cos(\theta_1)}$$

por lo tanto:

$$A' = \tan^{-1} \left(\frac{\overline{CX}}{\overline{CT}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\overline{CO} \tan |\theta_s - \theta_L|}{R_{tierra} \tan \theta_1} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{R_{tierra}}{\cos \theta_1} \tan |\theta_s - \theta_L|}{R_{tierra} \tan \theta_1} \right)$$

$A' = \tan^{-1} \left(\frac{\tan |\theta_s - \theta_L|}{\sin \theta_1} \right) \dots \dots \dots (1)$

La fórmula obtenida (1) permite, con los datos conocidos, evaluar el acimut geográfico teórico, es decir la dirección geográfica hacia donde debe apuntarse la antena de la estación a partir del norte geográfico.

Esta fórmula se modifica de acuerdo a lo siguiente:

1.- En el hemisferio norte

- Si la estación terrena está al oeste del satélite: $A = 180^\circ - A'$
- Si la estación terrena está al este del satélite: $A = 180^\circ + A'$

2.- En el hemisferio sur

- Si la estación terrena está al oeste del satélite: $A = A'$
- Si la estación terrena está al este del satélite: $A = 360^\circ - A'$

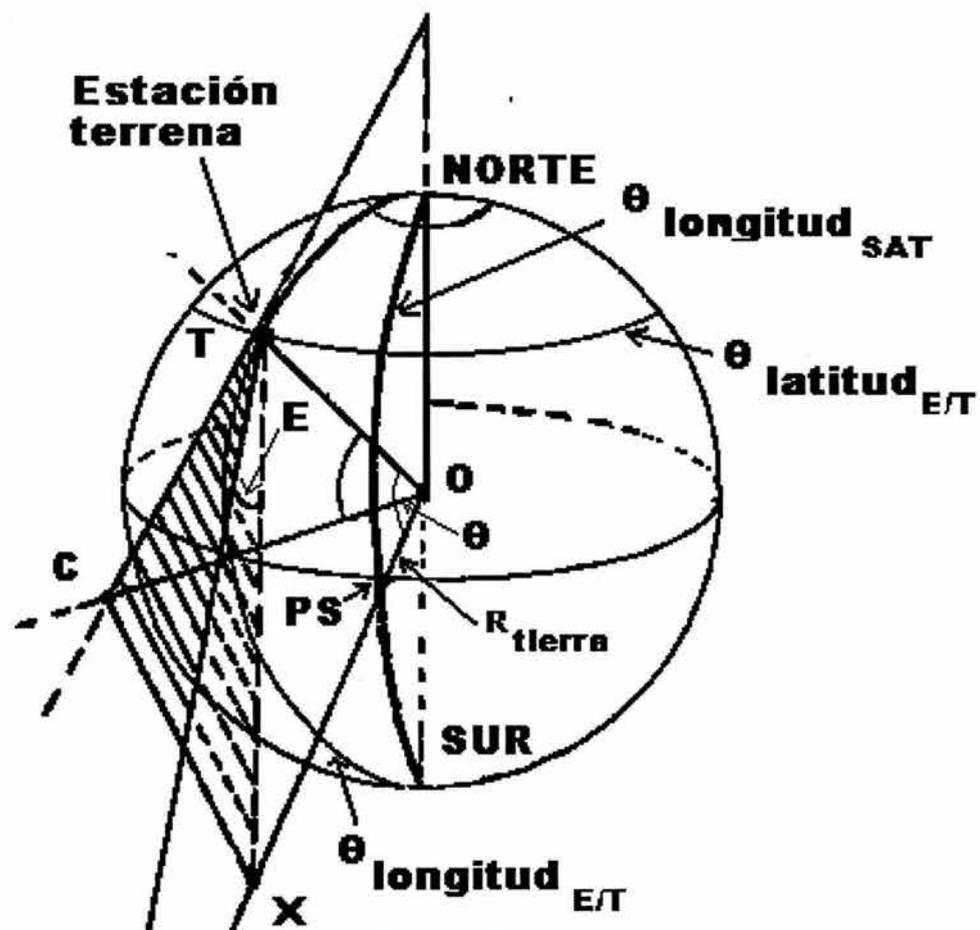


Fig. (a)

PS = punto subsatelital

TCX = plano horizontal

OTS = plano vertical

TS = distancia al satélite

AZIMUT, ELEVACION Y DISTANCIA AL SATELITE

Fig. 6.1 GEOMETRÍA BÁSICA

6.3.2 ELEVACIÓN

Una vez localizado el rumbo en el que se encuentra el satélite, el ángulo de elevación de la antena, permite apuntar el eje de máxima radiación hacia el satélite, a partir del plano horizontal de la estación (en la Fig. 1, es el ángulo entre los segmentos \overline{TX} y \overline{TS}). De las figuras 6.2 y 6.3 se concluye que: $E = \phi - \theta$, es decir, la elevación depende de ángulos cuyos valores no pueden medirse directamente, por lo tanto hay que expresarlos en términos de los datos dados. Del triángulo TXO de la Fig. 6.4:

$$\cos(\theta) = \frac{R_{tierra}}{OX}; \quad \theta = \cos^{-1} \left(\frac{R_{tierra}}{OX} \right)$$

Considerando los triángulos CXO y TCO de la Fig. 6.4:

$$\overline{CO} = \frac{R_{tierra}}{\cos(\theta_1)}; \quad \overline{OX} = \frac{\overline{CO}}{\cos(|\theta_s - \theta_L|)} = \frac{R_{tierra}}{\cos \theta_1 \cos(|\theta_s - \theta_L|)}$$

por consiguiente:

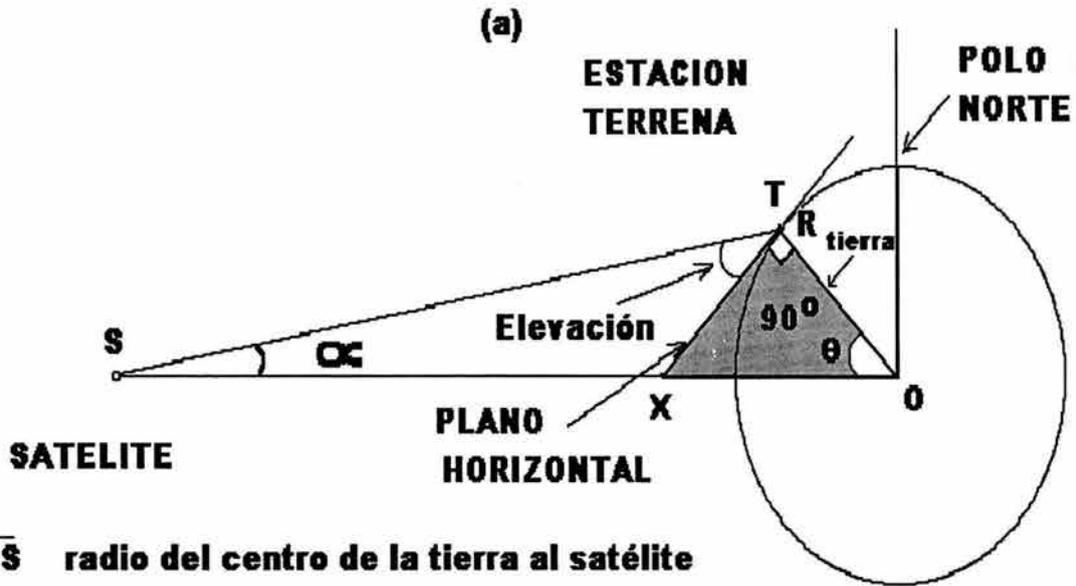
$$\theta = \cos^{-1} [\cos \theta_1 \cos(|\theta_s - \theta_L|)]$$

A partir del triángulo TUS de la Fig. 6.3:

$$\begin{aligned} \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{\overline{SU}}{\overline{TU}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{r - R_{tierra} \cos \theta}{R_{tierra} \sin \theta} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{r - R_{tierra} \cos \theta_1 \cos(|\theta_s - \theta_L|)}{R_{tierra} \sin \left[\cos^{-1} [\cos \theta_1 \cos(|\theta_s - \theta_L|)] \right]} \right) \end{aligned}$$

Sustituyendo en $E = \phi - \theta$:

$$\boxed{E = \tan^{-1} \left(\frac{r - R_{tierra} \cos \theta_1 \cos(|\theta_s - \theta_L|)}{R_{tierra} \sin \left[\cos^{-1} [\cos \theta_1 \cos(|\theta_s - \theta_L|)] \right]} \right) - \cos^{-1} [\cos \theta_1 \cos(|\theta_s - \theta_L|)]} \dots \dots \dots (2)$$



\overline{OS} radio del centro de la tierra al satélite

\overline{OT} radio del centro de la tierra a la estación

\overline{TS} distancia de la estación al satélite

OTS Triángulo en el plano vertical $\cos(\theta) = \frac{R_{\text{tierra}}}{\overline{OX}}$

$$180^\circ = \theta + (E + 90^\circ) + \alpha$$

$$\theta = 180^\circ - (E + 90^\circ) - \alpha$$

$$\theta = 90^\circ - E - \alpha = [90^\circ - (E + \alpha)]$$

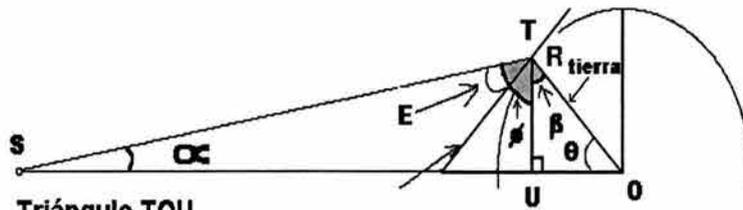
$$\theta = [90^\circ - (E + \alpha)]$$

$$\frac{\sin(\alpha)}{R_{\text{tierra}}} = \frac{\sin(E + 90^\circ)}{h + R_{\text{tierra}}}$$

ÁNGULO ENTRE LA ESTACIÓN, EL CENTRO DE LA TIERRA Y EL SATÉLITE

Fig. 6.2 RELACIONES TRIGONOMÉTRICAS EN EL PLANO VERTICAL

Figura (b)



Triángulo TOU

$$180 = \beta + \theta + 90 \rightarrow \beta = (90^\circ - \theta)$$

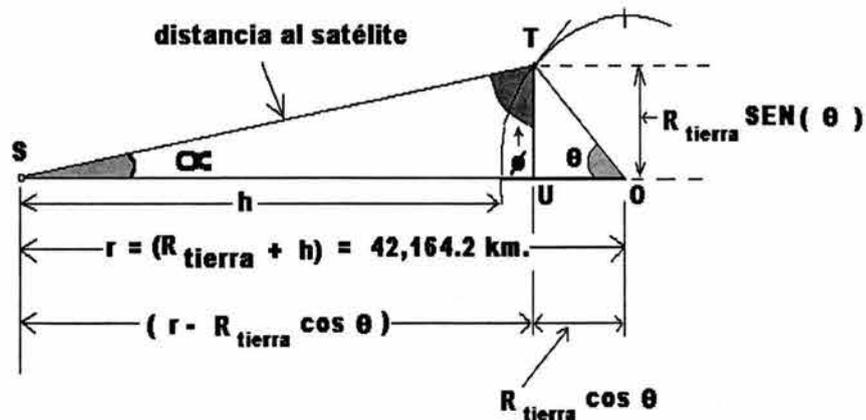
Del triángulo TOS de la Fig. 2.0 (b) y del triángulo TOX de la Fig. 2.0 (a) se observa que:

$$\begin{aligned} E &= \beta + \phi - 90^\circ = (90^\circ - \theta) + \phi - 90^\circ \\ &= \phi - \theta = \text{ángulo de elevación de la antena} \end{aligned}$$

$$\overline{OU} = R_{\text{tierra}} \cos(\theta)$$

$$\overline{TU} = R_{\text{tierra}} \text{SEN}(\theta)$$

$$\cos(x - y) = \cos x \cos y + \text{sen } x \text{ sen } y$$



$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{SU}{TU} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{(r - R_{\text{tierra}} \cos(\theta))}{R_{\text{tierra}} \text{SEN}(\theta)} \right)$$

$$d^2 = (R_{\text{tierra}} + h)^2 + (R_{\text{tierra}})^2 - 2(R_{\text{tierra}})(R_{\text{tierra}} + h) \cos(\theta)$$

ÁNGULO DE ELEVACIÓN Y DISTANCIA AL SATELITE

Fig. 6.3 RELACIONES TRIGONOMÉTRICAS BÁSICAS EN EL PLANO VERTICAL

6.3.3 COBERTURA Y DISTANCIA AL SATÉLITE

La cobertura de un satélite está en función de su altura. Para un satélite geostacionario en promedio es de 35786 km. La máxima cobertura se da cuando la elevación de la antena que apunta al satélite es $E = 0^\circ$, en un punto tangente a la superficie terrestre (observar Fig. 6.2 (a)).

La distancia de la estación terrena al satélite está en función del lugar donde se ha instalado el equipo y la antena, de las figuras 6.2 (a) y (b), se observa que la relación trigonométrica para estimarla es:

$$d^2 = (R_{tierra} + h)^2 + R_{tierra}^2 - 2 R_{tierra} (R_{tierra} + h) \cos\theta$$

Sin embargo, el ángulo θ no puede medirse directamente y hay que expresarlo en términos de los datos dados; para ello primero lo evaluamos mediante la identidad trigonométrica:

$$\begin{aligned} \cos [90 - (E + \alpha)] &= \cos(90) \cos(E + \alpha) \\ &+ \text{sen}(90) \text{sen}(E + \alpha) , \\ &= \text{sen}(E + \alpha) \end{aligned}$$

además, de la fig. 6.2 (a), se tiene:

$$\alpha = \text{sen}^{-1} \left[\frac{R_{tierra} \cos E}{R_{tierra} + h} \right]$$

al substituir en la fórmula de la distancia resulta:

$$d^2 = (R_{tierra} + h)^2 + R_{tierra}^2 - 2 R_{tierra} (R_{tierra} + h) \text{sen} \left[E + \text{sen}^{-1} \left(\frac{R_{tierra} \cos E}{R_{tierra} + h} \right) \right] \dots (3)$$

Calculada la distancia, puede obtenerse el tiempo de retardo de la señal que se recibe. Considere la distancia desde el edificio Valdés Vallejo, de la División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, en Ciudad Universitaria (México D.F.), al Satmex 5:

Con la elevación previamente calculada de 59.62 grados, se obtiene:

$$Dist_{al\text{satélite}} = \sqrt{R_{SAT}^2 + R_{tierra}^2 - 2 R_{tierra} R_{SAT} \text{sen}(A)}$$

donde:

$$A = \left\{ \text{Elevación} + \left[\arcsen\left(\frac{R_{tierra}}{R_{SAT}}\right) \right] [\cos(\text{Elevación})] \right\}$$

R_{sat} = longitud media del centro de la tierra al satélite = 42164.2 km

R_{tierra} = radio promedio de la tierra = 6378.15 km

Elevación = 59.62°

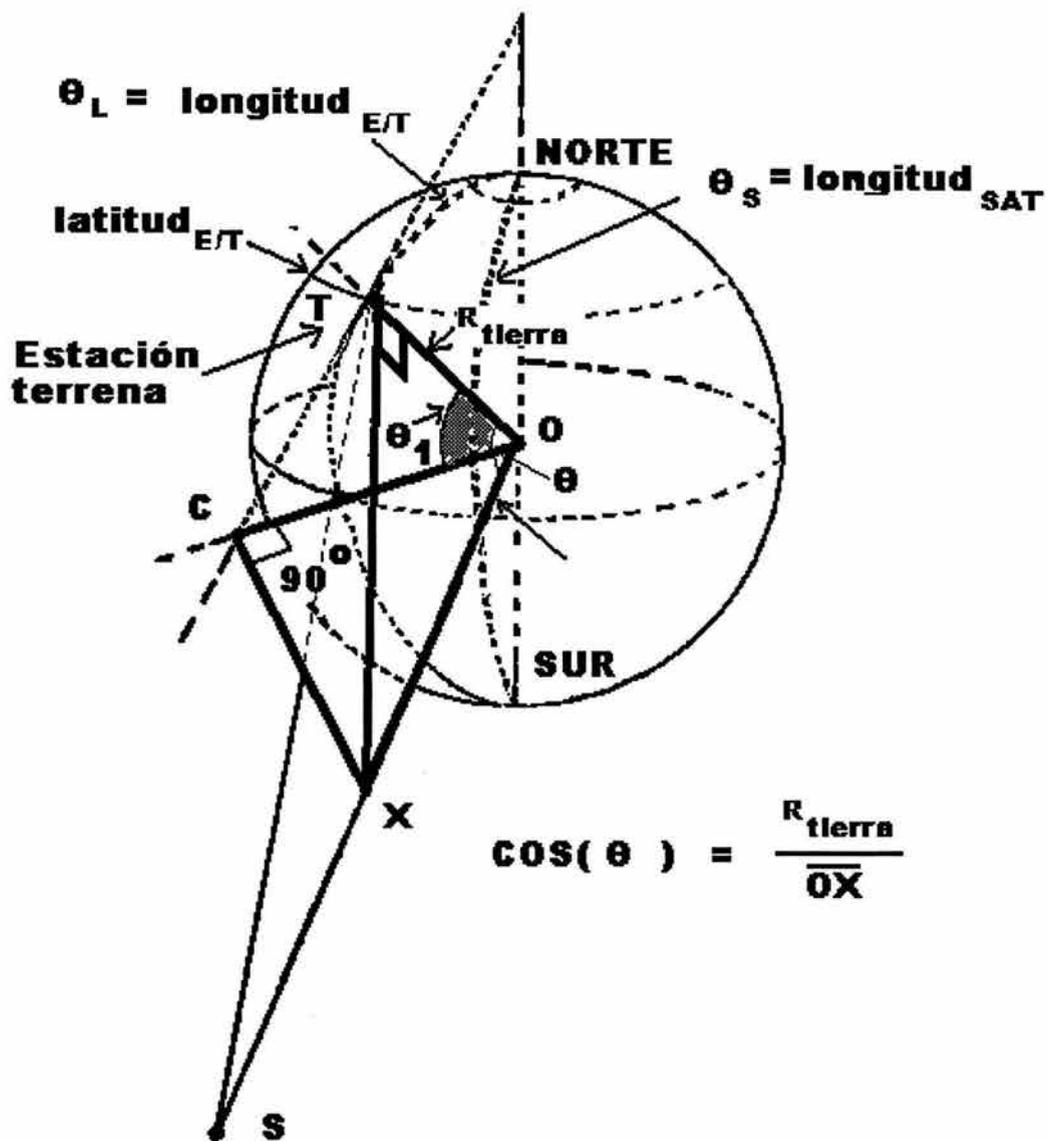
Substituyendo:

$$A = \left\{ 59.6 + \left[\arcsen\left(\frac{6378.15}{42164.2}\right) \right] [\cos(59.6)] \right\} \approx 1.11706$$

$$Dist_{al\text{satélite}} = \sqrt{42164.2^2 + 6378.15^2 - 2 \cdot 6378.15 \cdot 42164.2 \text{sen}(1.117)}$$

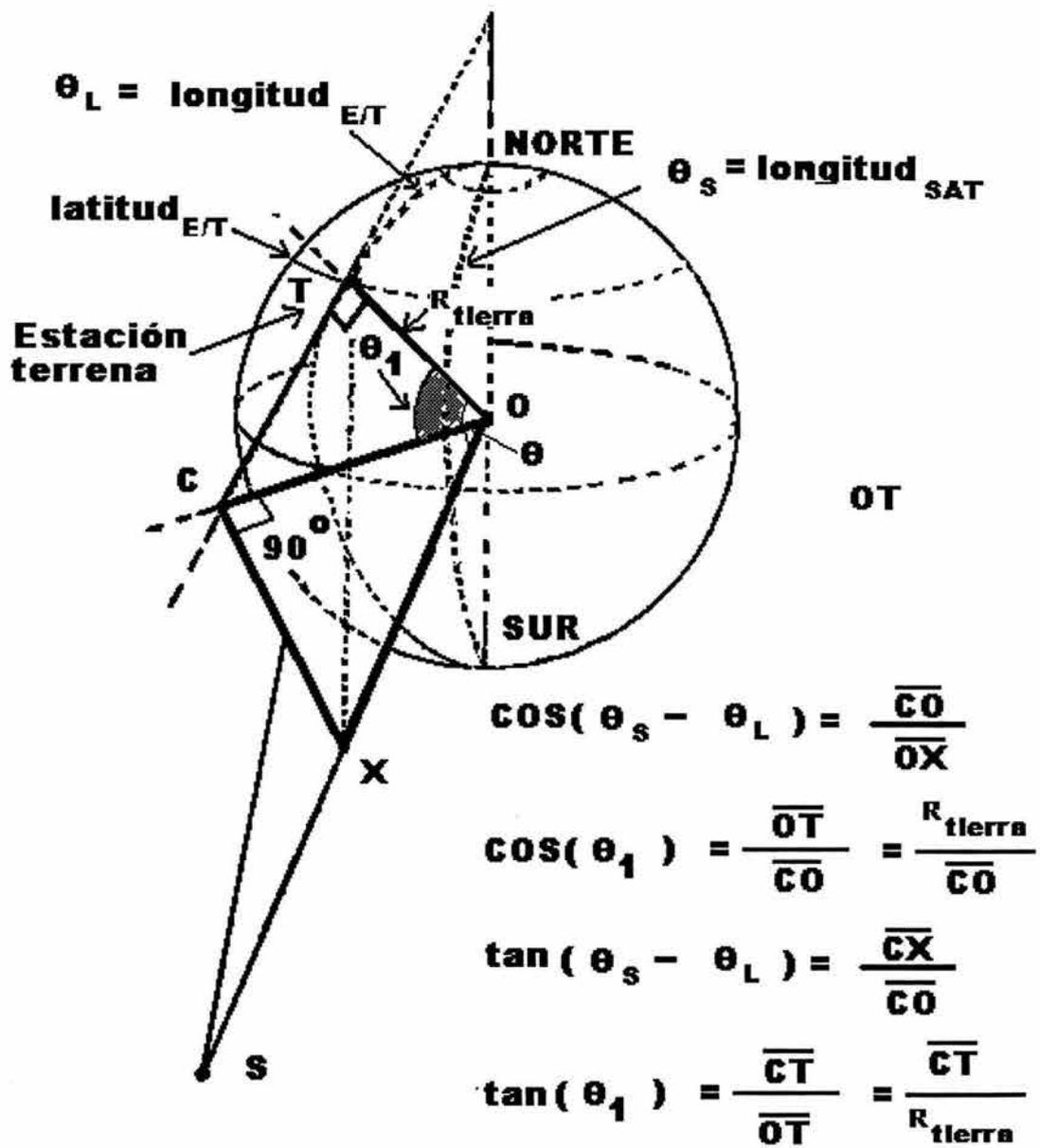
$$\approx 36538.533 \text{ km.}$$

El retardo de la señal puede obtenerse mediante un osciloscopio de dos cañones que muestre tanto la señal que se transmite como la que se recibe simultáneamente. Para este caso se recomienda mandar una señal predeterminada (conocida).



INTERSECCION DE LOS PLANOS TXO y OCX

Figura 6.4



RELACIONES GEOMETRICAS ENTRE PLANOS

Figura 6.3

6.3.4 DECLINACIÓN MAGNÉTICA

Como ya se indicó, la orientación de la antena hacia el satélite, está dada por el azimut o ángulo de orientación de la antena con respecto al norte geográfico. En la práctica se orienta con respecto al norte magnético (lectura de la brújula) y se corrige sumando o restando la declinación magnética ("desviación en grados entre el norte geográfico y el norte magnético"), según la posición del satélite:

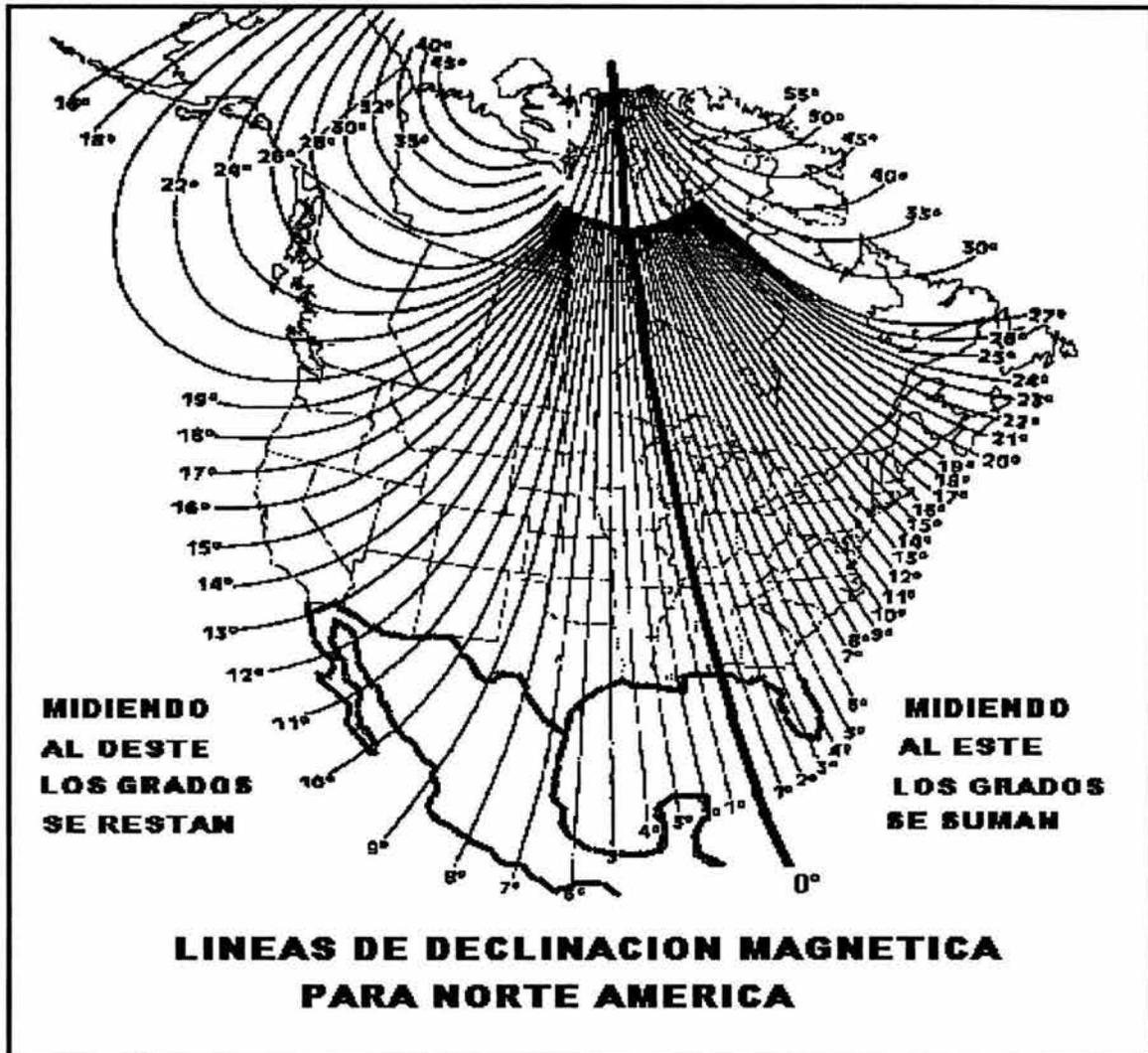


FIGURA 6.5 CARTA DE DECLINACIÓN MAGNÉTICA PARA NORTEAMÉRICA

Cada lugar tiene su propia declinación magnética (fig. 6.5) que modifica el azimut geográfico. Por ejemplo para orientar la antena parabólica de la estación terrena del edificio Valdés Vallejo, en Ciudad Universitaria, D. F., hacia el Satmex 5, ubicado en longitud 116.8 oeste, el azimut es: $180^\circ + 44.1 + 7 = 231^\circ$ (ver Fig. 6.7).

La declinación magnética(fig. 6.5), varía de un lugar a otro y siempre debe tomarse en cuenta para obtener el azimut verdadero. A continuación se muestra una carta global (fig. 6.6):



FIGURA 6.6 CARTA GLOBAL DE DECLINACIÓN MAGNÉTICA.

Generalmente se cuenta con tablas de la declinación magnética e incluso con programas en Internet que calculan el azimut.

Una vez realizado el cálculo del azimut, se obtiene la elevación:

Con los datos: latitud 19.4° , longitud 99.15° , resulta $E = 59.62^{\circ}$.

A continuación el eje de la parábola se alinea con la elevación obtenida y se procede a orientar la antena con el valor obtenido de azimut (rumbo geográfico). En el entorno de ese valor se realiza un ajuste fino, tanto en elevación como en azimut para recibir el mejor nivel de señal.

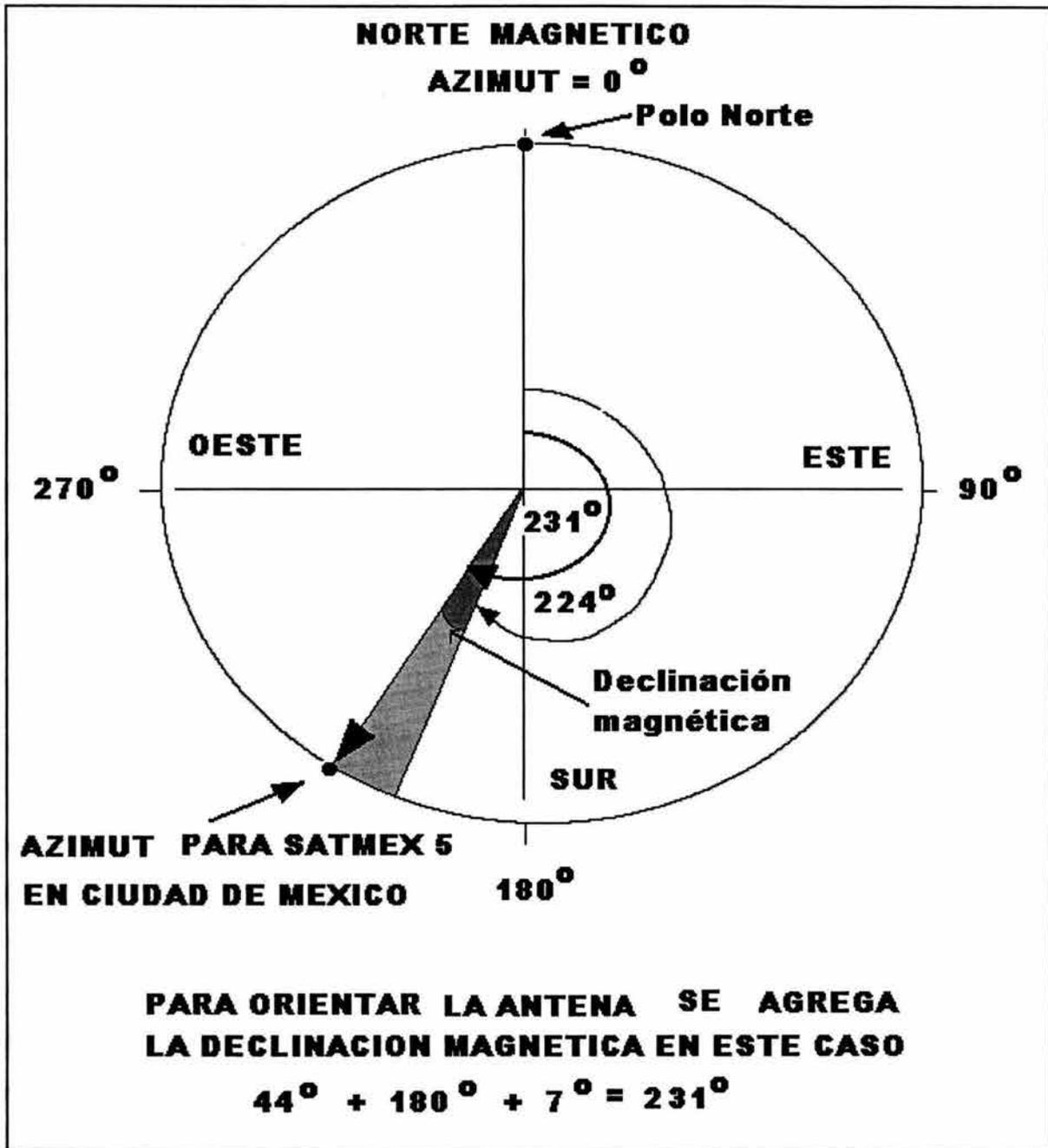


FIGURA 6.7 AZIMUT DEL SATMEX5 EN MÉXICO D.F.

Debe tomarse en cuenta que los cálculos son aproximados, pues los cálculos emplean el norte geográfico, y las latitudes y longitudes son con respecto a una esfera perfecta y la tierra dista mucho de serlo pues presenta triaxialidad, además la altura con respecto al nivel del mar de muchos lugares también altera ligeramente los cálculos que se realizan.

El ajuste fino se realiza corrigiendo primero el mejor azimut de la antena y, a continuación nuevamente la elevación (ver fig 6.8), para tratar de alinear la antena lo mejor posible con respecto al satélite y recibir así la mejor señal.

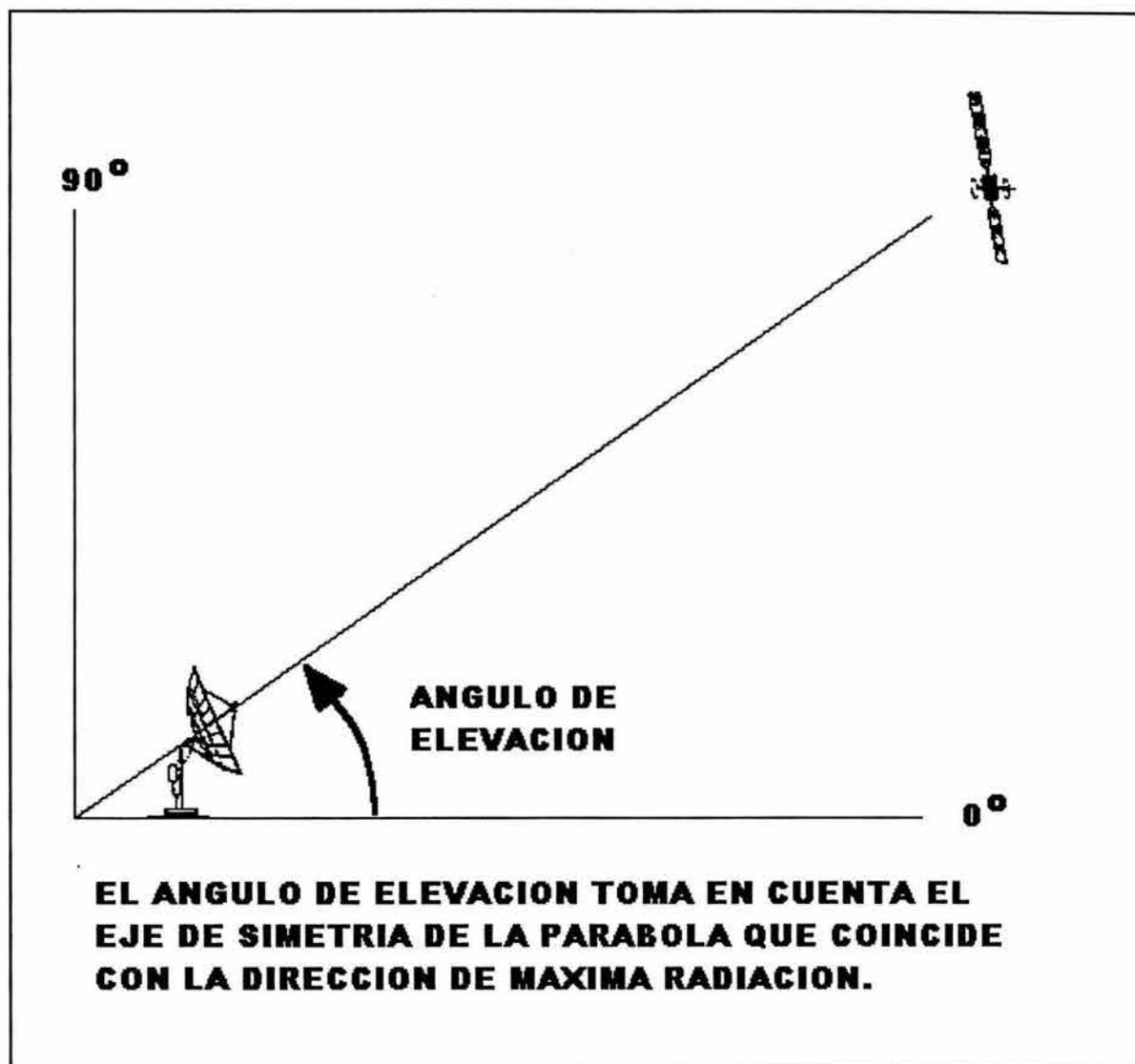


FIGURA 6.8 AJUSTE FINO DEL ANGULO DE ELEVACIÓN DE LA ANTENA.

Por último, se recomienda repetir una última vez los pasos anteriores en el entorno de los valores previamente determinados hasta recibir el mejor nivel de la señal (el óptimo).

En caso de emplearse antenas offset, debe tenerse en cuenta que, al faltar una sección de la parábola, su eje apunta en una dirección dada por su parámetros de construcción y, hay que agregar del orden de 22° al inclinómetro, para obtener la dirección real en la que apunta.

6.3.5 ORIENTACIÓN DE ANTENAS UTILIZANDO UN ANALIZADOR DE ESPECTROS

Se orienta la antena con base en los datos de longitud, latitud, azimuth y elevación, normalmente tabulados por Satmex para todas sus regiones de cobertura y, a continuación, con el analizador de espectros conectado a la banda de frecuencias intermedia (en el convertidor de bajada), se reajusta la orientación hasta recibir el mejor nivel de potencia de una señal en banda Ku sin modular, de amplitud constante y gran estabilidad en frecuencia ($\pm 0.3 \text{ ppm}$) que el centro de control localizado en Iztapala (Contel) genera y que el satélite retransmite (transmisor de radiofaro o beacon con redundancia 2:1); es decir, el nivel recibido de ésta señal permite el reapuntamiento de las antenas terrestres hacia el satélite y establece un nivel de referencia de portadoras a nivel usuario; en operación normal también permite que la estación terrena controle la potencia del enlace ascendente y la compense en condiciones atmosféricas adversas.

6.4 CONSIDERACIONES GENERALES DEL ANÁLISIS DEL ENLACE

El enlace satelital se analiza separando en dos partes la problemática:

- Problemas en la trayectoria de la señal. Esta parte involucra un análisis detallado de las pérdidas (atenuación de la señal en los equipos y pérdidas en la atmósfera) contra la potencia transmitida y la ganancia de antena, por otro lado se consideran los
- Problemas por intermodulación e interferencias. La intermodulación está presente cuando se trabaja con varias portadoras y los amplificadores se emplean cerca de la saturación. Las interferencias son debidas a señales ajenas que llegan a los receptores.

6.4.1 PROBLEMAS EN LA TRAYECTORIA

La señal que viaja al hacia el satélite encuentra problemas de acoplamientos, mal apuntamiento y, al viajar por la atmósfera y el espacio problemas por la distancia y elementos extraños encontrados en la trayectoria como son los gases atmosféricos lluvia, etc.

6.4.1.1 ATENUACIÓN DE LA SEÑAL EN LOS EQUIPOS

- por desacoplamiento en la circuitería y guías de onda, etc. tanto en recepción como en transmisión.
- por los errores inherentes para alinear perfectamente las antenas,

Este conjunto de atenuaciones se conocen como pérdidas misceláneas y en general se aproximan con un valor de 0.5 hasta 1 dB .

6.4.1.2 PÉRDIDAS EN LA ATMÓSFERA

- por viajar en el espacio libre pues la energía también se dispersa en direcciones no deseadas,
- por la presencia de componentes gaseosos en la troposfera,
- por la presencia de lluvia/granizo y, en consecuencia:
- por polarización cruzada.

6.5 OBTENCIÓN DE LA EXPRESIÓN DE LA TRAYECTORIA

En general la energía que se convierte en calor al viajar por la atmósfera o que se dispersa al viajar en el espacio entre las estaciones y el satélite se considera, desde el punto de vista de la ingeniería, como pérdidas.

6.5.1 PÉRDIDAS POR VIAJAR EN EL ESPACIO LIBRE

Este cálculo se realiza comparando las antenas parabólicas directivas con una antena isotrópica ideal que radía ondas electromagnéticas en todas direcciones con densidad de potencia idéntica en toda la superficie de cualquier esfera hipotética de radio "d", la cual disminuye con el cuadrado de la distancia debido a la

divergencia $\frac{1}{4 \pi d^2}$.

La potencia que la parábola concentra en una dirección dada, se expresa en términos de una ganancia o relación entre la potencia que tendría que generar una antena isotrópica teórica y la que genera la parábola para que ambas produjesen la misma densidad de flujo de potencia en un área situada en una esfera a una distancia "d" (ver Fig. 6.1), de tal manera que la potencia recibida sea:

$$P_r = [P_t G_t] \frac{A_e}{4 \pi d^2} \quad ; \quad P_t G_t = PIRE \text{ (pot. isotrópica irradiada)} \quad . \quad (1)$$

$$\frac{P_t G_t}{4 \pi d^2} = \text{densidad de flujo de potencia}; \quad P_t = \text{potencia transmitida}$$

$G_t = \text{ganancia de transmisión}; \quad A_e = \text{área efectiva}; \quad d = \text{distancia}$

Dado que el área de la antena receptora puede expresarse como:

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4 \pi} \dots \dots \dots (2)$$

donde:

$G_r = \text{ganancia de la antena receptora}$

$\lambda = \text{longitud de onda de la frecuencia de la portadora}$

Al substituir (2) en (1), se observa que la potencia del enlace puede expresarse en términos de las ganancias de las antenas de transmisión, recepción y la distancia que las separa:

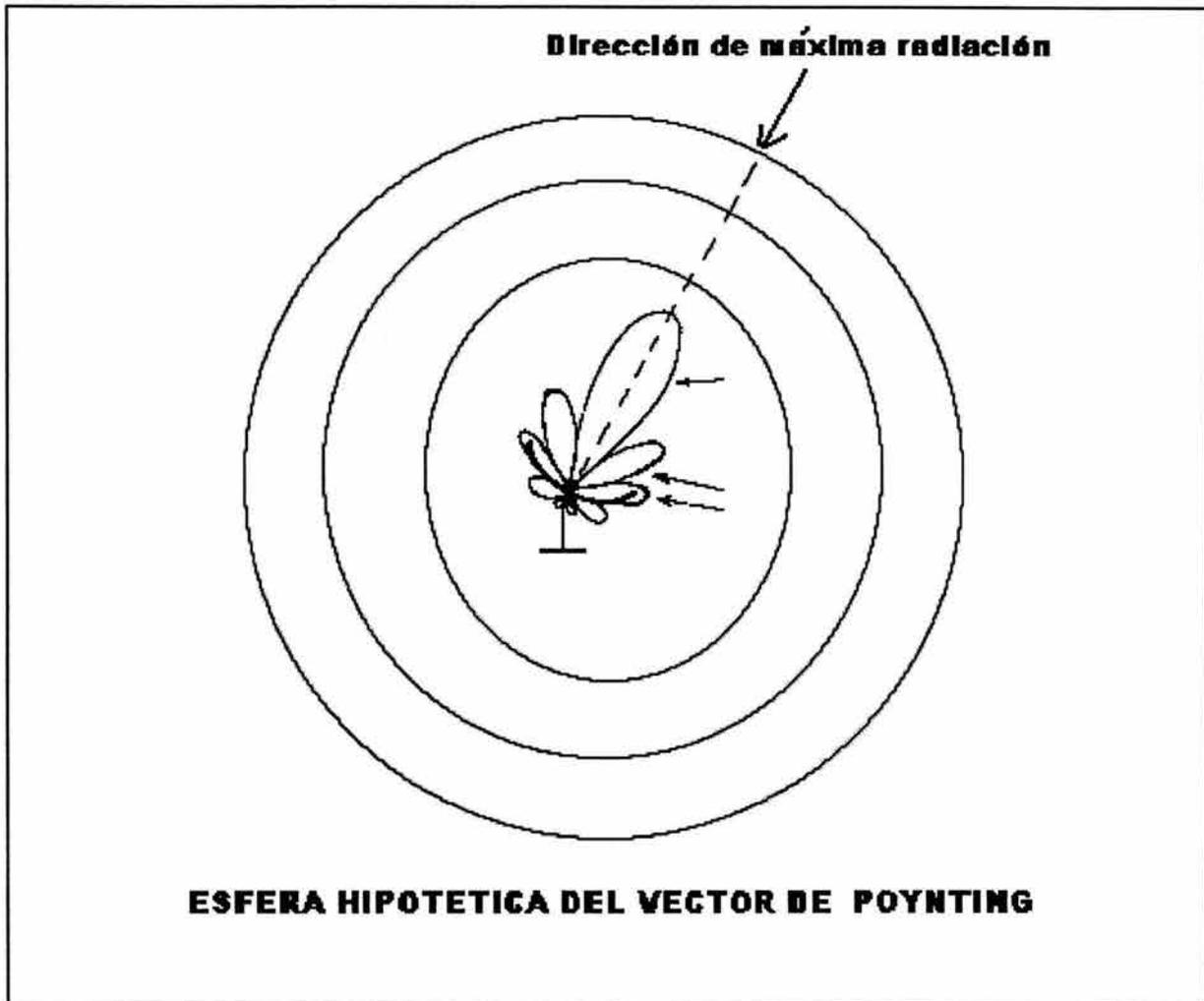


FIG. 6.1 POTENCIA ISOTROPICA IRRADIADA

$$P_r = [PIRE] \frac{1}{4\pi d^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} = [PIRE] G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

$$= \frac{(PIRE)(G_r)}{\left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2} = \frac{(PIRE)(G_r)}{\left(\frac{4\pi fd}{C} \right)^2}, \quad \text{donde: } \lambda = \frac{C}{f}$$

El denominador de la expresión anterior es un parámetro que puede asociarse a las pérdidas que han ocurrido en el espacio libre que separa a la antena receptora de la transmisora.

Por consiguiente, la potencia recibida a través del espacio libre (es decir, sin gases) expresada en dBW es por tanto:

$$P_r = \frac{PIRE G_r}{L_{FS}}$$

donde:

$$L_{FS} = \text{pérdidas en el espacio libre} = 20 \log\left(\frac{4\pi f d}{C}\right) \dots\dots\dots (3)$$

Generalmente la potencia recibida se expresa mediante logaritmos:

$$P_r = PIRE + G_r - L_{FS} \dots\dots\dots (4)$$

Se comenta que la ubicación de las estaciones (latitud, longitud, orientación o acimut, ángulo de elevación y altura sobre el nivel del mar) que se enlazan, determina la distancia y con ello las pérdidas por viajar en el espacio libre.

6.5.2 PÉRDIDAS TOTALES AL ATRAVESAR LA ATMÓSFERA

Agregando en la expresión (4) las pérdidas por:

- desacoplamiento en la circuitería y guías de onda, etc. tanto en recepción como en transmisión,
- imposibilidad de alinear perfectamente las antenas,
- presencia de componentes gaseosos en la troposfera,
- presencia de lluvia y,
- posibles pérdidas de polarización,

Se considera el total de pérdidas en la trayectoria, de tal manera que la potencia recibida es:

$$P_r = PIRE + G_r - L_{FS} - L_A - L_{POL} - [L_T + L_R] - [L_{FTX} + L_{FRX}]$$

donde:

L_A = pérdidas por componentes gaseosos

L_{POL} = pérdidas por despolarización

$[L_T + L_R]$ = = pérdidas por mal apuntamiento de antenas

$[L_{FTX} + L_{FRX}]$ = pérdidas en circuitería de transmisión y recepción

Reagrupando podemos asociar de forma lógica lo siguiente:

- En el equipo de transmisión: la PIRE, afectada por las pérdidas por circuitería y acoplamiento para transmisión y las pérdidas por error en el apuntamiento de la antena hacia el satélite:

$$PIRE = P_{TX} G_{Tmax} - [L_{FTX} + L_T]$$

o en dBW:

$$PIRE = \frac{P_{TX} G_{Tmax}}{L_{FTX} L_T}$$

- Conjuntando en el medio de transmisión: las pérdidas a cielo abierto, pérdidas por componentes gaseosos y por lluvia se tiene:

$$L_{ATM} = L_{FS} + L_A + L_{RAIN}$$

o en dBW:

$$L_{ATM} = L_{FS} L_A L_{RAIN}$$

- En el satélite: la ganancia de la antena que recibe la señal desde la estación terrena, las pérdidas por inexacta alineación de la antena satelital con respecto a la estación terrena, las pérdidas por la circuitería y acoplamiento, así como las pérdidas por cambio de polarización en la señal:

$$G = G_{Rmax} - L_R - L_{FRX} - L_{POL}$$

o en dBW:

$$G = \frac{G_{Rmax}}{L_R L_{FRX} L_{POL}}$$

De esta manera, considerando las ganancias y pérdidas en el enlace, la expresión completa para la potencia recibida en el satélite es:

$$P_{RX} = \left[\frac{P_{TX} G_{Tmax}}{L_T L_{FTX}} \right] \left[\frac{1}{L_{FS} L_A L_{RAIN}} \right] \left[\frac{G_{Rmax}}{L_R L_{FRX} L_{POL}} \right] \dots \dots \dots (5)$$

A continuación el transpondedor del satélite cambia la frecuencia de la señal recibida y la retransmite mediante una portadora en otra frecuencia menor con lo cual se evita problemas entre la débil señal recibida y la potencia de la señal con que se retransmite; en el enlace de bajada el proceso de pérdidas y ganancias es similar a lo anterior, según muestran las figuras 6.2 y 6.3:

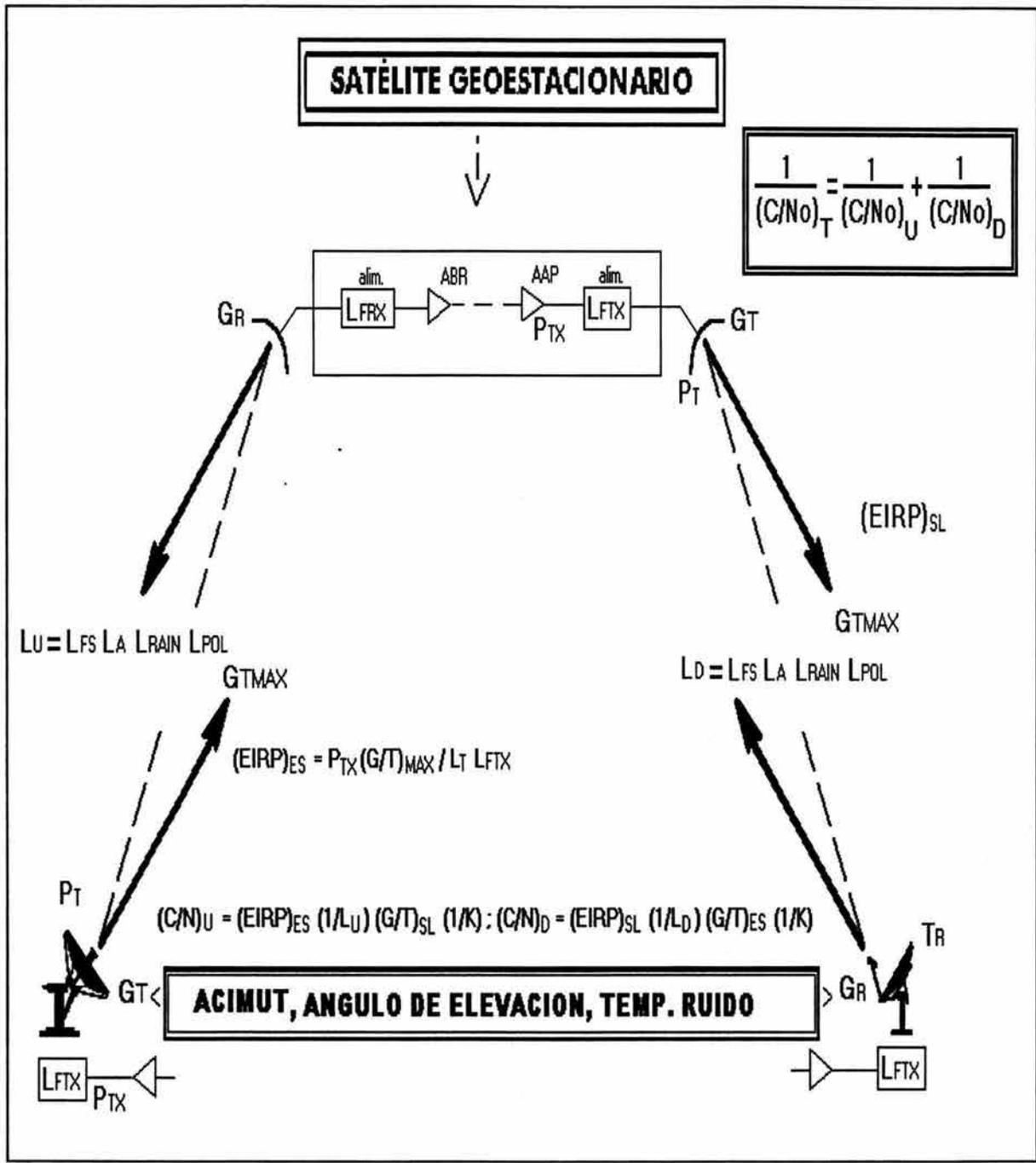


FIGURA 6.2 NOMENCLATURA EN UN ENLACE SATELITAL.

En la figura 6.3 se mencionan las pérdidas correspondientes a la nomenclatura indicada en la figura 6.2

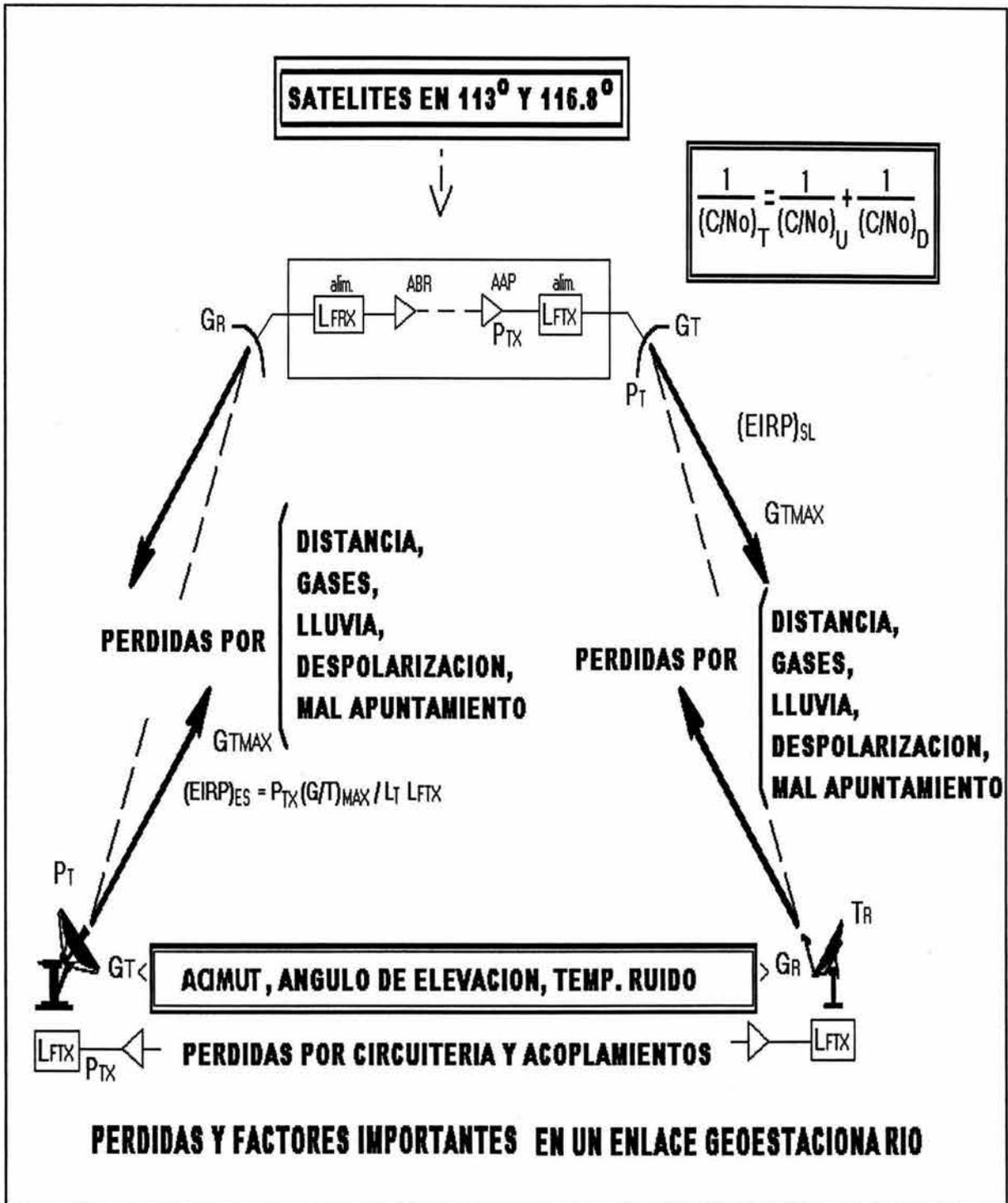


FIGURA 6.3 PERDIDAS EN LA TRAYECTORIA DEL ENLACE SATELITAL

6.6 PROBLEMAS POR INTERMODULACIÓN E INTERFERENCIAS

La intermodulación ocurre cuando los amplificadores del HPA y del transponder trabajan en la región de saturación o no linealidad o en su cercanía y se manejan varias señales; las interferencias cuando el satélite/estación receptora también reciben:

- otras señales dirigidas al satélite.
- señales dirigidas a satélites vecinos de órbita.
- otras señales provenientes del satélite y que se transmiten hacia el área de la estación receptora.
- señales provenientes de satélites vecinos de órbita que también cubren el área de la estación receptora.

La figura 6.4 muestra gráficamente el punto óptimo de operación de un TWT.

Las interferencias son importantes sobre todo en las primeras generaciones de satélites con frecuencias bajas hasta la banda C.

Dichas interferencias son menores con las nuevas generaciones de satélites y en particular desde banda Ku en adelante, pues la tecnología ha avanzado y la directividad es mucho mayor (prácticamente pueden despreciarse según se constatará con los cálculos del enlace en banda Ku).

6.6.1 PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN POR INTERMODULACIÓN

La curva de transferencia de potencia de un amplificador/transpondedor nos muestra que a máxima potencia se trabaja en la región no lineal de la amplificación. Por consiguiente cuando se operan múltiples transpondedores en el entorno de la región de no linealidad (cerca del punto de saturación), se generan interferencias o espectros de señales espurias que degradan la calidad de los enlaces, es decir, su desempeño, según se observa en las siguientes gráficas:

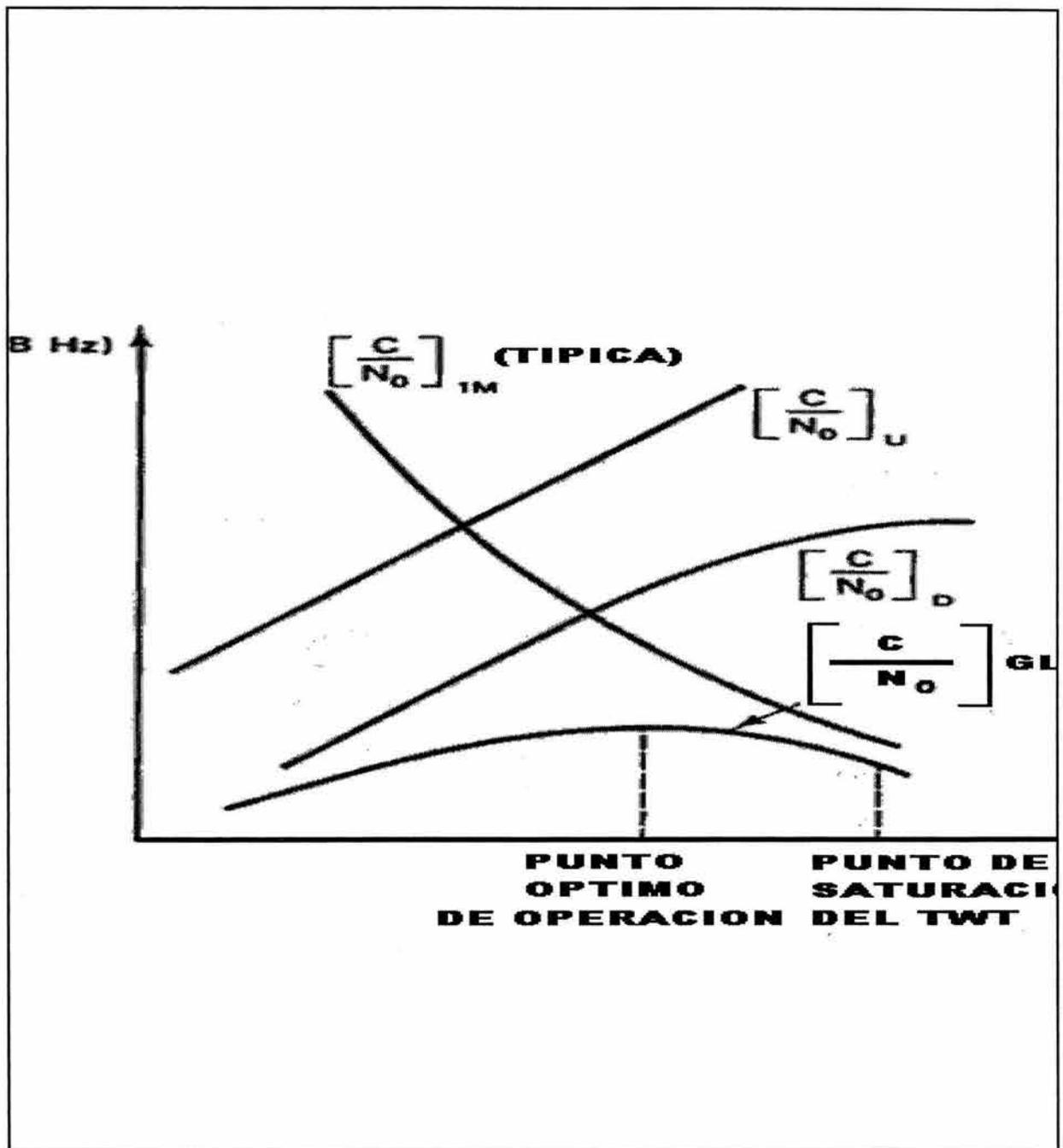


FIGURA 6.4 PUNTO ÓPTIMO DE OPERACIÓN DEL TWT.

En la gráfica 6.4, se muestra la disminución de potencia necesaria para reducir la intermodulación entre portadoras y en la figura 6.5 la intermodulación contra el aumento de portadoras.

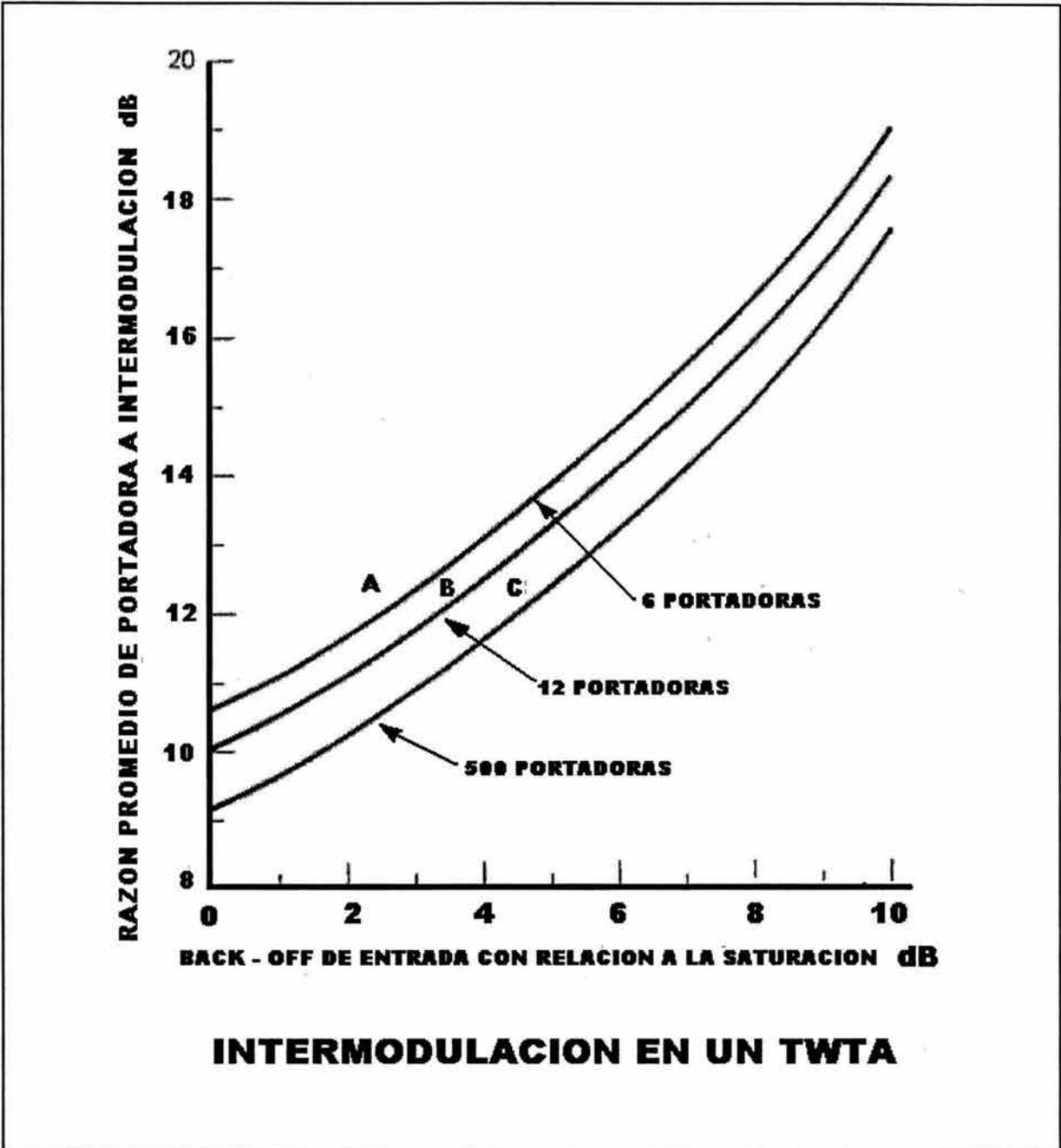


FIGURA 6.5 INTERMODULACIÓN VS AUMENTO DE PORTADORAS.

Para disminuir los problemas de intermodulación las recomendaciones son:

- Operar con menor potencia para reducir esos efectos: esta reducción de potencia se denomina "back off de entrada" (IBO o MBO_i) y a la correspondiente reducción de potencia en la salida (OBO o MBO_o).
- Ubicar las portadoras de mayor potencia en los extremos de frecuencia del transpondedor.

Los efectos de intermodulación aparecen también en las estaciones maestras en tierra o telepuertos que operan simultáneamente con varias portadoras (ver figura 6.5).

6.6.2 PROBLEMAS POR INTERFERENCIAS

Como ya se comentó, las antenas parabólicas concentran la energía en una dirección dada, sin embargo existe cierta ineficiencia de iluminación, que se incrementa por la presencia de lóbulos laterales y el hecho de que es muy difícil alinear exactamente los ejes de las antenas transmisora y receptora, esto constituye problemas de interferencia para los receptores vecinos pues las señales se amplifican en el satélite (fig. 6.6); también los patrones de cobertura a veces se interfieren (fig. 6.7).

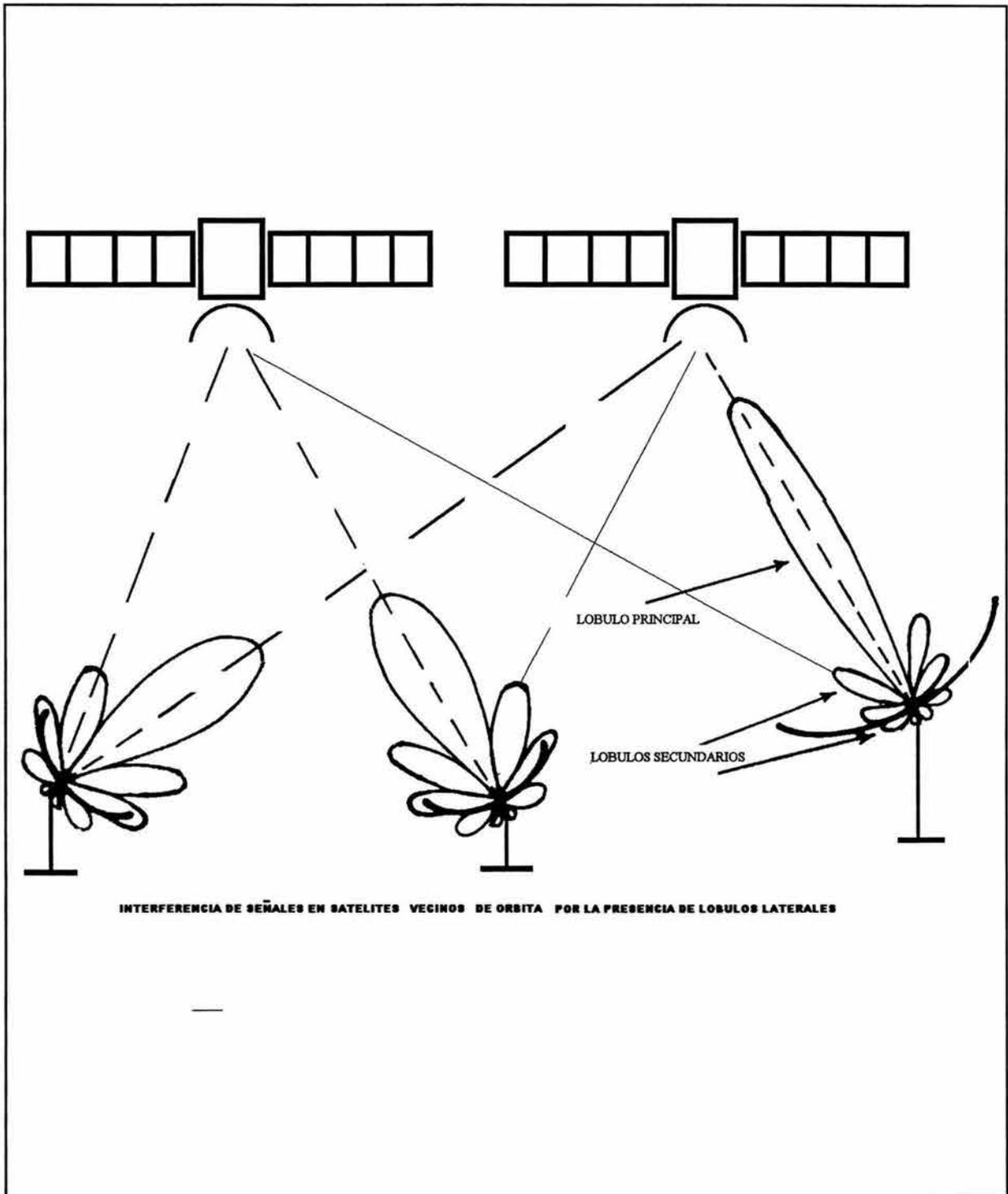


FIGURA 6.6 GENERACIÓN DE INTERFERENCIA POR LÓBULOS LATERALES.



FIGURA 6.7 INTERFERENCIA DE PATRONES DE COBERTURA

La señal que recibe el receptor generalmente puede estar afectada por interferencia de señales de satélites vecinos, además de interferencias por intermodulación del satélite con el que se enlaza y por problemas de polarización cruzada.

En consecuencia en la recepción la señal puede recibirse muy atenuada y además, en este caso, verse afectada por la presencia de ruidos de diversas fuentes (señales incoherentes) e interferencias (por intermodulación, polarización cruzada y señales no deseadas).

La calidad del enlace se determina con base en las razones C/N (portadora/ruido) de subida y bajada del satélite y la figura de mérito

del sistema:
$$\frac{1}{(C/N)_T} = \left(\frac{1}{(C/N)_U}\right) + \frac{1}{(C/N)_D} \dots\dots\dots (6)$$

6.7 CALIDAD DE LA RECEPCIÓN SATELITAL

La relación de la ganancia en el receptor y la temperatura de ruido da el factor de calidad de la estación que recibe. El factor G/T dado por el proveedor incluye los valores de los parámetros más importantes que permiten mejorar la relación portadora/ruido o C/N que indica la magnitud de la portadora con relación al ruido presente en la recepción. También se calcula considerando que los dispositivos de elementos resistivos con cuatro puertos pueden catalogarse como atenuadores con temperatura de ruido dada dada por:

$$T_e = (L_F - 1) T_F$$

donde:

L_F = pérdidas en el atenuador, T_F = temperatura ambiente.

Puesto que la arquitectura típica de un receptor se muestra en la figura 6.8:

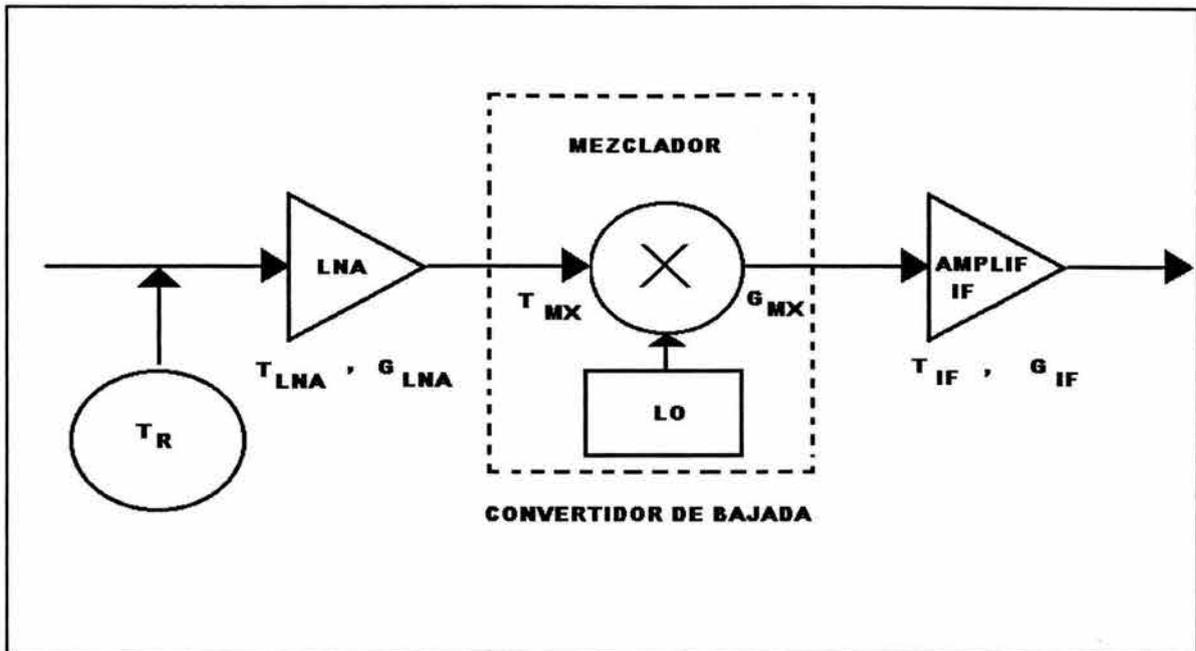


FIGURA 6.8 RECEPTOR SATELITAL.

al considerar en cascada los efectos de ruido en las distintas etapas para la relación G/T obtenemos la figura de mérito tanto para el satélite, como para la estación terrena que recibe del satélite:

$$(G/T) = \left[\frac{G_{RMAX}}{L_R L_{FRX} L_{POL}} \right] \left[\frac{T_A}{L_{FRX}} + T_F \left(1 - \frac{1}{L_{FRX}} \right) + T_R \right] (K^{-1})$$

Como ya se indicó, las tablas del proveedor del servicio satelital proporcionan la PIRE, el valor G/T y la densidad de flujo de saturación de cada transpondedor del satélite para cada región de cobertura, por ejemplo la Ciudad de México (región 4) en banda Ku. También proporcionan valores operativos de interferencias diversas.

Debe tenerse en cuenta que la señal recibida, por lo general es de magnitud muy pequeña y, en ocasiones en niveles cercanos a los del ruido, de ahí la importancia de contar con buenos amplificadores de bajo ruido y que el ambiente exterior no afecte más a la señal que se recibe.

6.8 CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE FLUJO DE SATURACIÓN DEL SATÉLITE (DFS)

Para calcular la densidad de flujo de potencia para saturar al transpondedor se consideran condiciones ideales a cielo abierto y una sola portadora:

$$DFS = \Phi = \frac{PIRE_U}{4 \pi^2} = \frac{PIRE_U}{L_{FS}} \frac{4 \pi}{\lambda^2} \quad [W/m^2]$$

en decibeles:

$$DFS = \Phi = PIRE_U - L_{FS} + \frac{4 \pi}{\lambda^2} \quad [dBW/m^2]$$

La densidad de flujo de saturación normalmente es un dato que el proveedor del servicio satelital indica y factura en particular para cada una de las regiones de cobertura.

A continuación se muestra una tabla resumen de las pérdidas y ganancias a calcular en el enlace satelital completo.

6.8 RESUMEN DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS EN LA TRAYECTORIA DEL ENLACE

a) En la subida al satélite:

	POTENCIA TRANSMITIDA (+)	
<p>BALANCE EN LA ESTACION TERRENA. Nos permite calcular la potencia isotrópica radiada</p> $EIRP_{ES} = \frac{P_{TX} (G/T)_{MAX}}{L_T L_{FTX}}$	<p>GANANCIA DE ANTENA (+)</p>	<p>Es la razón de la potencia radiada por unidad de ángulo sólido. Entre más grande la antena, hay siempre mejores ganancia y eficiencia.</p>
	(-) PÉRDIDAS ENTRE AMPLIFICADOR Y ANTENA	
	(-) PÉRDIDAS POR MAL APUNTAMIENTO DE ANTENAS	
	<p>(-) PÉRDIDAS A CIELO DESPEJADO</p>	<p>Está dado por la relación de la potencia transmitida y la recibida usando antenas isotrópicas.</p>
<p>PÉRDIDAS DE SUBIDA:</p> $L_U = L_{FS} L_A L_{RAIN} L_{POL}$	<p>(-) PERD. POR ATENUACIÓN ATMOSFERICA.</p>	<p>Se debe a los gases atmosféricos.</p>
	<p>(-) PERD. POR LLUVIA</p>	<p>Es la mayor de las pérdidas en el enlace.</p>
	<p>(-) PERD. POR DESPOLARIZACIÓN</p>	<p>Es ocasionada por la lluvia y en poca medida por la nieve y algunos otros fenómenos atmosféricos.</p>

A la señal se suman principalmente los ruidos externos que dependen de la dirección en la que apunta y que aumentan si el ángulo de elevación es bajo; también se agregan los ruidos internos o de circuitería. Estos ruidos definen una temperatura de ruido de la antena que incluye la constante de Boltzman

($k = 1.379 \times 10^{-23} = -228.6 \text{ dB (WHz K)}$) en el cálculo de la relación

portadora/ruido de subida: $(C/N)_U = EIRP_{ES} \left(\frac{1}{L_U}\right) (G/T)_{SL} \left(\frac{1}{k}\right)$

b) En la bajada del satélite a la estación que se enlaza:

	POTENCIA TRANSMITIDA (+)	
<p>BALANCE EN EL SATÉLITE. Nos permite calcular la potencia isotrópica radiada por el satélite:</p> $EIRP_{SL} = \frac{P_{TX} (G/T)_{MAX}}{L_R L_{FTX}}$	(+) GANANCIA DE ANTENA	Es la razón de la potencia radiada por unidad de ángulo sólido. Entre más grande la antena, hay siempre una mejor ganancia y cierta eficiencia.
	(-) PÉRDIDAS ENTRE AMPLIF. Y ANTENA	
	(-) PÉRDIDAS POR MAL APUNTAMIENTO	
	(-) PÉRDIDAS A CIELO DESPEJADO	Está dado por la relación de la potencia transmitida y la recibida usando antenas isotrópicas.
<p>PÉRDIDAS DE BAJADA:</p> $L_D = L_{FS} L_A L_{RAIN} L_{POL}$	(-) PÉRD. POR ATENUACIÓN ATMOSF.	Se debe a los gases atmosféricos.
	(-) PÉRDIDAS POR LLUVIA	Es la mayor de las pérdidas en el enlace.
	(-) PÉRD. POR DESPOLARIZACIÓN	La ionósfera y la lluvia principalmente la ocasiona.
<p>La señal recibida está afectada principalmente por ruidos externos que dependen de la dirección en la que apunta la antena y del ángulo de elevación; los ruidos internos dependen de la calidad del equipo. Estos ruidos definen una temperatura de ruido de la antena que se incluye en el cálculo de la relación portadora/ruido de bajada:</p> $(C/N)_D = EIRP_{ES} \left(\frac{1}{L_D}\right) (G/T)_{SL} \left(\frac{1}{k}\right)$		

6.9 CÁLCULO PRÁCTICO DE UN ENLACE ENTRE DOS LOCALIDADES

6.9.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Recuérdese que el objetivo del cálculo de un enlace es determinar el margen de atenuación (o potencia suficiente) para que la señal enfrente atenuaciones, interferencias y los problemas climatológicos eventuales sin graves consecuencias; éste está dado por la diferencia entre el valor C/N que el enlace requiere para transmitir adecuadamente frente a dichos problemas y, el valor C/N que la señal necesita para propagarse con cierta energía por bit, así como una velocidad y ancho de banda dados. Los pasos para determinarlo son:

- a) Definir las características o datos de las estaciones terrenas a enlazar, por ejemplo instalaciones gemelas en las ciudades de México y la ciudad de Morelia y los servicios y parámetros asociados al satélite Satmex 5, seleccionando antenas, potencia del transmisor, características de modems y multiplexores.
- b) Realizar los cálculos preliminares de las estaciones terrenas al satélite en función de su ubicación, para apuntar las antenas hacia el satélite, con los acimuts y ángulos de elevación de las antenas en función de la latitud, longitud de cada estación con la declinación magnética que corresponda.
- c) Determinar el margen de atenuación del enlace, para lo cual:
 - 1) Se calcula la relación C/N de subida al satélite, considerando la PIRE o potencia necesaria para enlazar con el satélite.
 - 2) Se calcula la relación C/N del satélite a la estación terrena con que se enlaza con la estación que recibe.
 - 3) Se determina la relación Portadora/ruido del enlace completo.
 - 4) Se calcula el margen del enlace para aceptar o reconsiderar los parámetros para lograrlo.

a)

6.9.2 DATOS DE LAS ESTACIONES TERRENAS Y DEL SATÉLITE SATMEX 5

	Información: voz y datos a 128 kbps, modulación BPSK, Roll off de 14%	
Señales de transmisión/recepción, antenas y ubicaciones	Antena de 3.8 en México con ganancia de transmisión de 53.2 dBi, 2.4 en Morelia y ganancia de recepción de 47.6 dBi y temperatura de ruido del sistema de 22.12 dB °K	
	Ciudad de México: latitud 19.35 °, longitud 99.01 °	
	Ciudad de Morelia: latitud 19.70 °, longitud 101.12 °	
	Código FEC:	1/2
Datos de modems:	Tasa de bits erróneos (BER):	10 ⁻⁷
	Energía de bit/densidad espectral de ruido (E _b /N ₀):	6.6 dB
	Longitud: 116.8 oeste, región 4, transponder 1	
Datos del satélite banda Ku	Ancho del transpondedor: 4K (54 MHz)	
	Frecuencia ascendente: 14.06975 GHz	
	Frecuencia descendente: 11.76975 GHz	
	Back Off de entrada para 1 portadora en saturación 0, multiportadoras: 8 dB	
	Back Off de salida para 1 portadora en saturación 0, multiportadoras: 5 dB	
	Intermodulación ascendente (C/I) ₀ = -122.46 dBHz, descend. = -102.47 dBHz	
	Interf. pol. cruzada (C/X) ₀ asc = -116.47 dBHz, descendente = -114.47 dBHz	
	Interf. satélites vecinos (C/X) _{SATADY0} ascend. = -126.47, desc. = -18.887 dBHz	
	PIRE: D.F. 40.81 dBW, Morelia 40.79 dBW;	
	G/T: D.F. 29.8 dB/K, Morelia 25.48 dB/K;	
	DFS: D.F. -99.26 dBW/m ² , Morelia -99.22 dBW/m ² .	
	Atenuador de posición (ATP): 14 dB	

Los datos del satélite se obtienen de las tablas proporcionadas por Satmex.

Antes de adquirir el equipo satelital se recomienda realizar el cálculo con los datos de diversos proveedores, para estimar la potencia necesaria del transmisor y el tamaño óptimo de la antena, pues esos

son los parámetros que pueden escogerse en el comercio. Si el equipo ya ha sido adquirido, no es posible cambiar el diámetro de la antena y sólo se puede estimar el nivel óptimo de potencia para que el enlace soporte las condiciones climáticas adversas.

	Back off In/Out 1 portadora en saturación	0/0 Nivel de amplificación en control automático
	Atenuador de posición ATP	14
PARÁMETROS OPERACIONALES DEL SATMEX 5 EN BANDA Ku	Back off In/Out multiportadora	8/5 Nivel de amplificación lineal
	C/I de intermodulación en saturación	Up = 35 Down = 18 multiportadora
	C/X por polarización cruzada	Up = 29 Down = 30
	C/X por satelites colindantes	Up = 39 Down = 28
<p>Los niveles de retención de potencia y las densidades de interferencia son características dadas por el proveedor del servicio satelital y son específicos de cada satélite en órbita.</p>		

NOTA: Satmex intercala un atenuador de posición para disminuir la intermodulación entre portadoras múltiples, además normalmente sugiere al usuario una PIRE/portadora para enlazarse con el satélite, por ejemplo de 46.4 dBW si la estación está en el D.F. y se usará el SATMEX5.

6.10 CALCULOS PRELIMINARES: ACIMUT, ELEVACIÓN Y DISTANCIA AL SATÉLITE

En este ejemplo se orienta la antena parabólica de la estación terrena ubicada en el edificio Valdes Vallejo, en Ciudad Universitaria, D. F., hacia el Satmex 5, ubicado en longitud 116.8 oeste, empleando las fórmulas obtenidas en el análisis teórico:

6.10.1 ACIMUT

$$Acimut_{Geog} = \arctan\left(\frac{\tan(|(longitud_{SAT} - longitud_{ET})|)}{\text{sen}(latitud_{ET})}\right)$$

Dado que la ET está en el hemisferio norte y al este del satélite:

$$\begin{aligned} Acimut_{exacto} = Acimut_{\text{re}} &= 180^\circ + Acimut_{Geog} \\ &= 180 + 44.1^\circ \approx 224^\circ \end{aligned}$$

6.10.2 DECLINACIÓN MAGNÉTICA

Una vez medido el ángulo de 224.1° o 224° , a partir del norte magnético hacia el este, éste se corrige tomando en cuenta la declinación magnética para la ciudad de México: + 7 grados. Con ello el Acimut a considerar es $231.1^\circ \approx 231^\circ$.

6.10.3 ELEVACIÓN DE LA ANTENA

Se calcula considerando los radios promedio de la tierra y de la órbita geoestacionaria (6378.155 y 42,164.2 km respectivamente), la posición geográfica de la estación y la longitud del satélite.

$$A = [\cos(latitud_{ET})][\cos(longitud_{SAT} - longitud_{ET})]$$

$$Elevación = \frac{\arctan((R_{SAT})(A))}{(R_{tierra})\{\text{sen}\{\arccos(A)\}\}} - \arccos(A) \approx 59.62^\circ$$

Una vez determinado el mejor acimut de la antena, se procede a un ajuste fino en elevación (ver fig 6.10) para alinear la antena lo mejor posible con respecto al satélite y recibir así la mejor señal.

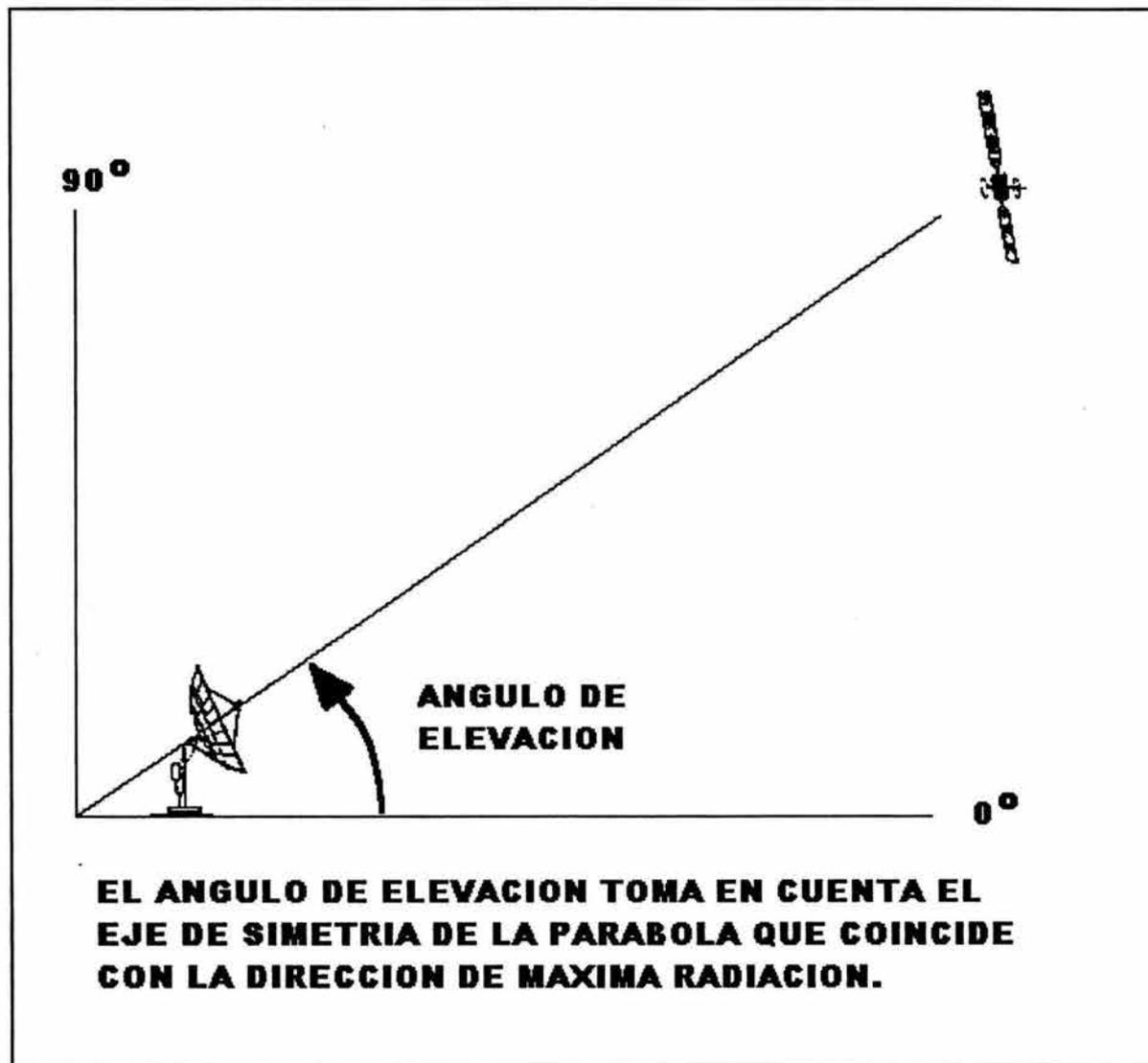


FIGURA 6.10 AJUSTE FINO DEL ANGULO DE ELEVACIÓN DE LA ANTENA.

En caso de emplearse antenas tipo offset, debe agregarse $+22^\circ$, pues su foco está desplazado con respecto a una parábola común.

6.10.4 DISTANCIA AL SATELITE

Por último calculamos la distancia de las estaciones terrenas al satélite de acuerdo a la elevación anterior:

$$Dist_{al\ sat\acute{e}lite} = \sqrt{R_{SAT}^2 + R_{tierra}^2 - 2 R_{tierra} R_{SAT} \text{sen}(A)}$$

donde:

$$A = \left\{ \text{Elevación} + \left[\arcsen\left(\frac{R_{tierra}}{R_{SAT}}\right) \right] [\cos(\text{Elevación})] \right\}$$

Para el ejemplo los datos para obtener la distancia del D.F. al satélite son:

$$R_{sat} = \text{longitud media del centro de la tierra al satélite} = 42164.2 \text{ km}$$

$$R_{tierra} = \text{radio promedio de la tierra} = 6378.15 \text{ km}$$

$$\text{Elevación} = 59.55^\circ$$

Substituyendo:

$$A = \left\{ 59.55 + \left[\arcsen\left(\frac{6378.15}{42164.2}\right) \right] [\cos(59.55)] \right\} \approx 1.11706$$

$$Dist_{al\ sat\acute{e}lite} = \sqrt{42164.2^2 + 6378.15^2 - 2(6378.15 \times 42164.2) \text{sen}(1.117)}$$

$$\approx 36537.065 \text{ km.}$$

De manera similar, el cálculo de la distancia entre la ciudad de Morelia y el satélite es 36584.2 km., con una elevación de 60.78°.

6.11 ENLACE DE LA ESTACIÓN TERRENA TRANSMISORA AL SATÉLITE

El objetivo de este cálculo es determinar la relación (C/N) ascendente, es decir, de la señal que sube al satélite (del D.F. al Satmex 5 en el ejemplo), lo cual se realiza en dos pasos:

- cálculo de la relación Portadora/ruido sin interferencias y,
- cálculo de la relación (C/N) ascendente total o suma del valor obtenido en el paso anterior y las densidades de las interferencias normalmente presentes (por intermodulación, polarización cruzada y por arribo de otras señales, (Fig. 6.11).

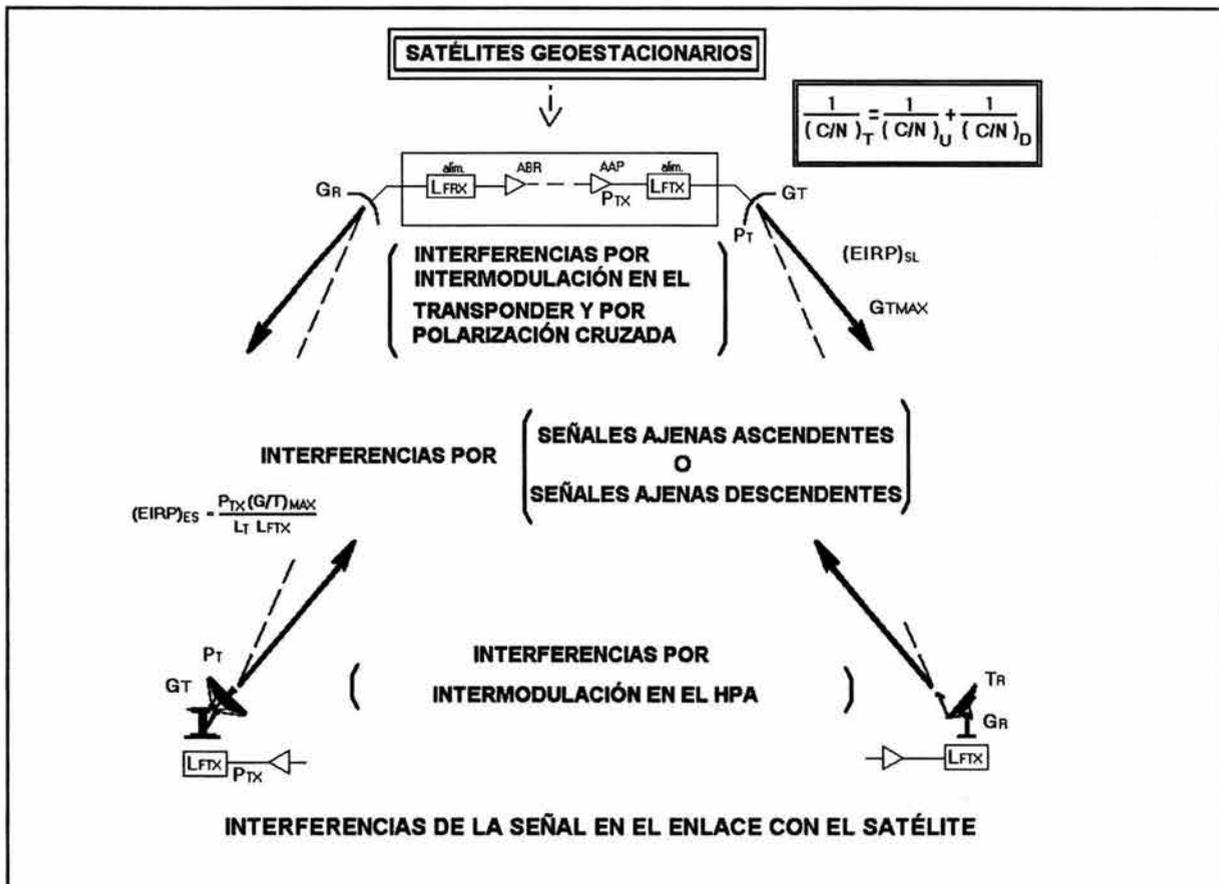


FIG. 6.11 INTERFERENCIAS EN EL ENLACE

6.11.1 CÁLCULO DE C/N ASCENDENTE SIN INTERFERENCIAS

En esta parte del enlace se determina la relación Portadora/Ruido_ ascendente, considerando en el factor (C/N_o) las perdidas y ganancias en la trayectoria (como son la potencia y las pérdidas por distancia, lluvia, acoplamiento y apuntamiento, así como la ganancia de antena satelital, etc.), así como el ancho de banda que utiliza la señal.

$$(C/N)_{ASCEND} = (C/N_o)_{ASCEND} - 10 \log(BW_{empleado}) \dots \dots \dots (7)$$

$$(C/N_o)_{ASCEND} = PIRE_{ET} + (G/T)_{SAT} - K - L_{FS_{ASC}} - L_{RAIN} - L_{MISCELANEAS} - 10 \log(BW_{empleado}) \dots \dots \dots (8)$$

Para éste ejemplo se usa el valor sugerido por Satmex que indica una PIRE/portadora de 46.4 dBW.

La figura de mérito $(G/T)_{SAT}$ también es un dato tomado de las tablas que el proveedor del servicio da para el satélite. Por ejemplo 3.6 dBW para el Satmex5 transponder 1 para el D.F.

K es la constante de Boltzman = -228.6 (dBJ/°K)

$L_{FS_{ASC}}$ son las pérdidas por viajar en el espacio libre ascendente (obtenidas al substituir en la fórmula número 3 de pérdidas por distancia). En el ejemplo se calcularon para la frecuencia ascendente de 14.06975 MHz de la estación en el D.F.:

$$L_{FS} = 20 \log \left(\frac{4 \pi (14.06975 \times 10^9)(36537.55 \times 10^3)}{(3 \times 10^8)} \right) \approx 206.6623 \text{ dB}$$

L_{RAIN} es el margen de atenuación por lluvia ascendente. Por ejemplo 4.2 en el D.F.

$L_{MISCELANEAS}$ en la mayoría de los casos considera la suma de las siguientes pérdidas: por mal apuntamiento de antenas, de circuitería o alimentación y malos acoplamientos (0.3 dB en promedio), de polarización (0.2 dB en promedio) y por absorción atmosférica (0.5 dB en promedio). Para el enlace se considera 1.0 dB en total.

$$L_{MISC} = L_A + L_{POL} + L_{apuntamiento} + L_{alimentacion}$$

donde:

L_A = pérdidas por componentes gaseosos

L_{POL} = pérdidas por despolarización

$L_{apuntamiento}$ = pérdidas por mal apuntamiento de antenas

$L_{alimentacion}$ = pérdidas en circuitería de transmisión y recepción

Sustituyendo en la fórmula para (C/No):

$$(C/N_o) = 46.4 + 3.6 - (-228.6) - 206.66 - 4.2 - 1.0 \approx 66.74 \text{ dB Hz}$$

La fórmula para la relación (C/N) ascendente sin interferencias, así como las correspondientes al cálculo de los valores de interferencia que se utilizan en el siguiente paso, requieren que se determine el ancho de banda empleado por la señal que se transmite, mismo que a continuación se obtiene:

$$BW_{empleado} = (V_{información})(FEC)^{-1}(FM)(1 + RollOff)$$

FM = Factor de modulación. Depende del tipo empleado por ejemplo:

para BPSK $FM = 1$, para QPSK $FM = 0.5$

$RollOff$ = Factor de ensanchamiento del espectro
[característica del modem (dato)]

NOTA: Satmex considera otro margen que se conoce como

"asignado u operativo", mayor que el empleado por la señal, pues en él se toma en cuenta cierto "márgen adicional" para evitar traslapes con señales adyacentes en el transponder. Su valor se obtiene multiplicando el ancho de banda que emplea la señal por un factor que Satmex asigna, según la fórmula:

$$BW_{asignado} = (BW_{empleado})(f_{asignada})$$

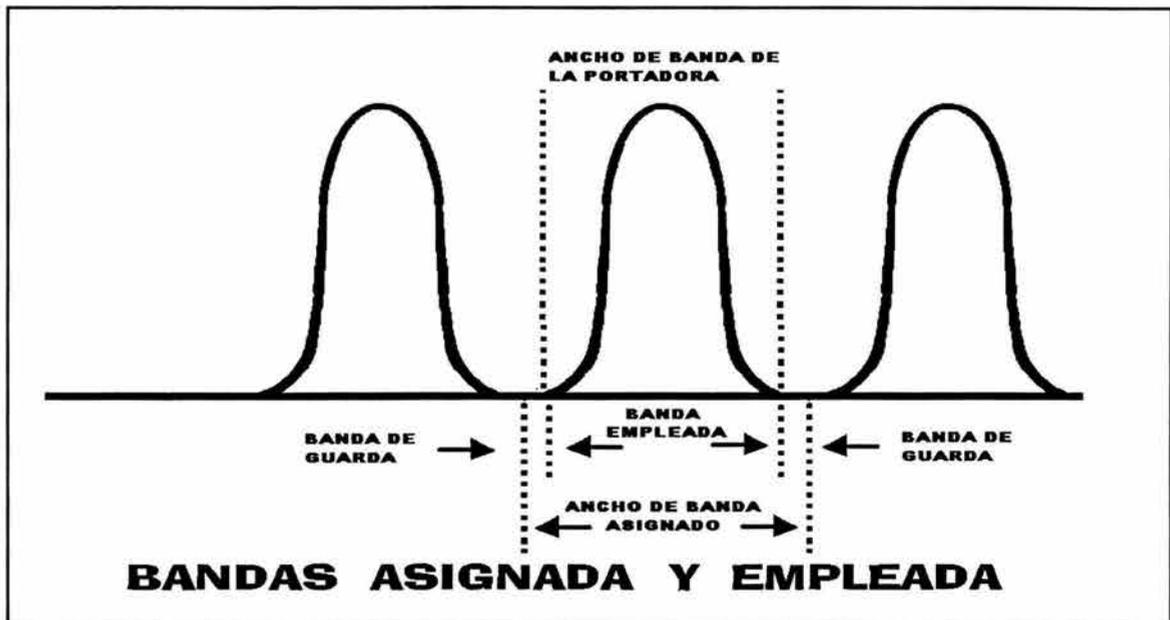


FIGURA 6.12 BANDAS DE GUARDA ENTRE PORTADORAS

Considérese como ejemplo el cálculo con los siguientes datos:

$$BW_{empleado} = (128,000)(1/2)^{-1}(0.5)(1 + 0.15)$$

$$BW_{empleado} = 147,200$$

considérese una $f_{asignada} = 1.37$, por consiguiente:

$$BW_{asignado} = 147,200 \times 1.37 = 201,664 \text{ (un poco más de 200 KHz)}$$

El ancho de banda asignado permite establecer la distancia adecuada entre las frecuencias operativas del enlace satelital.

De esta manera la relación portadora a ruido ascendente sin interferencias es:

$$(C/N)_{ASCEND} = (66.74) - 10 \log(147,200) \approx 15.061 \text{ dB}$$

6.11.2 CÁLCULO DE C/N ASCENDENTE CON INTERFERENCIAS

En este segundo cálculo se obtiene la relación portadora/ruido ascendente total sumando al valor previamente obtenido los valores estimados de las interferencias presentes, mismas que se determinan considerando ciertos datos base admisibles de operación o nominales que el proveedor del servicio satelital da [(C/I)_o, (C/X)_o, (C/X)_{SATADY_o}] para la banda Ku:

- para la relación Portadora/Ruido de intermodulación ascendente en el HPA de la estación terrena transmisora.

$$(C/I)_{ASCEND} = - (C/I)_o - OPBOi - 10 \log(BW_{empleado});$$

donde (C/I)_o es -122.466 dBHz en señal ascendente para el D.F.

- para la relación Portadora/Polarización cruzada de otras señales que también se dirigen al satélite.

$$(C/X)_{POL} = - (C/X)_o - OPBOi - 10 \log(BW_{empleado})$$

donde (C/X)_o es -116.466 dBHz (señales ascendentes D.F.)

- por último, para la Portadora/Señales hacia sats colindantes, o interferencias que producen las señales dirigidas a satélites vecinos de órbita.

$$(C/X)_{SATADY} = - (C/X)_{SATADY_o} - OPBOi - 10 \log(BW_{empleado});$$

donde: (C/X)_{SATADY_o} = -126.466 dBHz (señales ascendentes D.F.)

NOTA:

$$OPBOi = DFS - PIRE_{ET} + L_{P_{ASC}} + ATP + L_{MISC} + L_{RAIN}$$

DFS es la densidad de flujo de saturación que el proveedor indica

para México D.F. y que publica en sus tablas como -99.26 dBW/m².

$$L_{P_{ASC}} = 10 \log (4 \pi D^2) = 10 \log 4 \pi \times [36538.53 \times 10^3]^2 \approx$$

$$\approx 162.2469 \text{ dB}$$

ATP es el valor del atenuador de posición que Satmex indica como 14 para la banda Ku.

Substituyendo datos y calculando:

$$OPBO_i = -99.26 - 47.69 + 162.25 + 14 + 1.0 + 4.2 \approx 35.79 \text{ dB}$$

Reemplazando datos y cálculos en las fórmulas para las interferencias de intermodulación, polarización cruzada e interferencia de señales hacia satélites adyacentes se obtiene:

$$(CI)_{ASCEND} = -(-122.466) - 35.7869 - 51.68 \approx 35 \text{ dB}$$

$$(CX)_{POL} = -(-116.466) - 35.7869 - 51.68 \approx 29 \text{ dB}$$

$$(CX)_{SATADY} = -(-126.466) - 35.7869 - 51.68 \approx 39 \text{ dB}$$

Sumando:

$$\frac{1}{(CM)_{ASCEND_{total}}} = \frac{1}{(CM)_{ASCEND}} + \frac{1}{(CI)_{ASCEND}} + \frac{1}{(CX)_{POL}} + \frac{1}{(CX)_{SATADY}}$$

despejando se tiene:

$$(CM)_{ASCEND_{total}} = 10 \log \left[\frac{1}{CN + CI + CXP + CXS} \right] = (CM)_U$$

donde:

$$CN = \frac{1}{\text{alog}\left(\frac{(CN)_{ASCEND}}{10}\right)} = \frac{1}{\text{alog}(1.5059)} \approx 0.0312;$$

$$CI = \frac{1}{\text{alog}\left(\frac{(CI)_{ASCEND}}{10}\right)} = \frac{1}{\text{alog}(3.5)} \approx 0.000316$$

$$CXP = \frac{1}{\text{alog}\left(\frac{(CX)_{POL}}{10}\right)} = \frac{1}{\text{alog}(2.9)} \approx 0.001259;$$

$$CXS = \frac{1}{\text{alog}\left(\frac{(CX)_{SATADY}}{10}\right)} = \frac{1}{\text{alog}(3.9)} \approx 0.000126$$

expresando en dB:

$$(CN)_{ascend_{total}} = 10 \log \left[\frac{1}{0.0312 + 0.000316 + 0.001259 + 0.000126} \right] \approx 14.8281$$

es decir:

$$(CN)_U \approx 14.8281 \text{ dB}$$

Obsérvese que algunas interferencias son mínimas y con las nuevas generaciones de satélites son casi despreciables. En muchos casos los proveedores del servicio satelital dan directamente los valores (C/I) , $(C/X)_{POL}$, $(C/X)_{SATADY}$.

6.12 ENLACE DEL SATÉLITE A LA ESTACIÓN TERRENA RECEPTORA

El proceso es similar al previo y el objetivo es calcular la relación (C/N) descendente, misma que también puede obtenerse en dos

pasos:

- cálculo de la relación Portadora/ruido sin interferencias y
- cálculo de Portadora/ruido total descendente que agrega, a la relación sin interferencias, los valores estimados de las interferencias que recibe la estación terrena receptora.

6.12.1 PORTADORA/RUIDO DESCENDENTE SIN INTERFERENCIAS

Por consiguiente en la primera parte del enlace se determina la relación Portadora/Ruido descendente total libre de interferencias para el ancho de banda que emplea la señal:

$$(C/N)_{DESCEND} = (C/N_o) - 10 \log(BW_{empleado})$$

donde:

$$(C/N_o) = PIRE_{SAT} + (G/T)_{ET} - K - L_{FS_{DESCEN}} - L_{RAIN} - L_{MISCELANEAS}$$

La $PIRE_{SAT}$ del satélite por portadora que recibe la estación terrena incluye los back off's de entrada/salida en el transpondedor y es:

$$PIRE_{SAT} = -DFS_{SAT_{TX}} - L_{P_{desc}} - ATP + MBO_i - MBO_o + PIRE_{ET} + PIRE_{SAT_{RX}}$$

$DFS_{SAT_{RX}}$ es la densidad de flujo que el satélite envía hacia

la región transmisora (en el Distrito Federal) = - 99.26 dBW/m²

$$\text{donde: } L_{P_{desc}} = 10 \log(4\pi D^2) = 10 \log 4\pi \times [36584.2 \times 10^3]^2 \approx$$

$$\approx 162.26 \text{ dB}$$

$PIRE_{ET}$ inicialmente es el valor sugerido por el proveedor para enlazar con el satélite (46.4 dBW).

$$PIRE_{SAT_{RX}} = PIRE \text{ que el satélite envía hacia Morelia } \approx 40.79 \text{ dBW}$$

Calculando la PIRE del satélite (en dB):

$$PIRE_{SAT} = -(-99.26) - 162.234 - 14 + 8 - 5 + 46.4 + 40.79 \approx 13.19 \text{ dBW}$$

La $(G/T)_{ET}$ (figura de mérito de recepción) toma en cuenta la temperatura de ruido del receptor y la ganancia de la antena, pues cuanto más baja sea dicha temperatura menos ruido se agrega y es de más calidad al sistema de recepción. Esto es deseable dado que la señal recibida (en picowatts) puede ser equiparable a los niveles del ruido; esos datos técnicos son dados por el proveedor del equipo.

$$\begin{aligned} (G/T)_{ET} &= (G_{RX}) - 10 \log(T_{sistema}) = \\ &= 47.6 - 10 \log(22.12) \approx 34.15 \text{ dB}^\circ\text{K} \end{aligned}$$

K es la constante de Boltzman = -228.6 (dBJ/°K)

$L_{FS_{DES}}$ son las pérdidas por distancia para la señal que baja hacia la ciudad de Morelia cuya frecuencia es 11.76975 MHz.

$$L_{FS_{DES}} = 20 \log \left(\frac{4\pi (11.76975 \times 10^9)(36584.2 \times 10^3)}{(3 \times 10^8)} \right) \approx 205.12 \text{ dB}$$

L_{RAIN} es el margen de atenuación por lluvia descendente para la ciudad de Morelia cuyo valor de tablas es 2.2 dB.

$L_{MISCELANEAS}$ Para el enlace descendente se considera 1.0 dB.

$DFS_{SAT_{TX}}$ = es la densidad de saturación que el satélite envía hacia

$$\text{la localidad transmisora (México D.F.)} \approx -99.26 \frac{dBW}{m^2}.$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$(C/N_o) = 13.19 + 34.15 - (-228.6) - 205.12 - 2.2 - 1.0 \approx 67.62 \text{ dB Hz}$$

Por consiguiente la relación portadora a ruido descendente sin interferencias es:

$$(C/N)_{DESCEND} = (67.62) - 10 \log(147,200) \approx 15.94 \text{ dB}$$

6.12.2 PORTADORA/RUIDO TOTAL DESCENDENTE

Como segundo paso se realiza el cálculo de la relación portadora/ruido descendente total:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(C/N)_{DESCEND_{total}}} &= \frac{1}{(C/N)_o} + \frac{1}{(C/N)_{DESCEND}} + \frac{1}{(C/I)_{POL}} + \frac{1}{(C/I)_{SATADY}} \\ &= \frac{1}{(C/N)_D} \end{aligned}$$

Como ya se comentó, en esta fórmula se suma a la relación de la señal previamente calculada, las densidades de interferencias dadas por:

- la relación de interferencia dada por la relación (C/I) portadora/ruido de intermodulación que se produce en el amplificador del satélite.

$$(C/I)_{DESCEND} = - (C/I)_o - OPBOi_{total} - 10 \log(BW_{empleado});$$

donde $(C/I)_o$ para el área de Morelia es ≈ -102.466 dBHz

- la de la posible relación portadora/Polarización cruzada $(C/X)_{POL}$ de otras señales que también se originan en el satélite bajo el plan de reuso de frecuencia.

$$(C/X)_{POL} = - (C/X)_o - OPBOi_{total} - 10 \log(BW_{empleado})$$

donde $(C/X)_o$ para Morelia, es: ≈ -114.466 dBHz

- la de la relación portadora/Señales de sats colindantes $(C/X)_{SATADY}$ que corresponden a interferencias de señales de satélites vecinos de órbita y cuyo patrón de cobertura también cubre a la estación terrena receptora.

$$(C/X)_{SATADY} = PIRESAT - ((C/X)_{SATADY_o} - G_{ANT_{RX}}) - 10 \log(BW_{empleado});$$

donde: $(C/X)_{SATADY_o} \approx -11.783$ dBHz para Morelia.

NOTA: Para una sola portadora se tiene:

$$OPBOi = DFS - PIRE_{ET} + L_{FS} + ATP + L_{MISC} + L_{RAIN}$$

Al considerar multiportadoras, al valor anterior se le agregan los back off's de entrada/salida en el transpondedor y queda por tanto:

$$OPBOi_{total} = OPBOi + MBO_o - MBO_i$$

Substituyendo se tiene:

$$OPBOi = -99.26 - 46.4 + 162.23 + 14 + 0.5 + 1.0 \approx 35.787 \text{ dB}$$

$$OPBOi_{total} = 35.787 + 5 - 8 \approx 32.787 \text{ dB}$$

$$(C/I)_{DES} = - (-102.466) - 32.787 - 51.68 \approx 18 \text{ dB}$$

$$(C/X)_{POL} = - (-114.466) - 32.787 - 51.68 \approx 30 \text{ dB}$$

$$(C/X)_{SATADY} = 13.19 - (-18.89 - 47.6) - 51.68 \approx 28 \text{ dB}$$

La relación para la portadora es:

$$\frac{1}{(C/N)_{DES_{total}}} = \frac{1}{(C/N)_{DESCEND}} + \frac{1}{(C/N)_{DESCEND}} + \frac{1}{(C/X)_o} + \frac{1}{(C/X)_{SATADY}}$$

despejando se tiene:

$$(C/N)_{DES_{total}} = 10 \log \left[\frac{1}{CN + CI + CXP + CXS} \right] = (C/N)_D$$

donde:

$$CN = \frac{1}{\text{alog} \left(\frac{(C/N)_{DESCEND}}{10} \right)} = \frac{1}{\text{alog}(1.594)} \approx 0.025456;$$

$$CI = \frac{1}{\text{alog} \left(\frac{(C/N)_{DESCEND}}{10} \right)} = \frac{1}{\text{alog}(1.8)} \approx 0.01585$$

$$CXP = \frac{1}{\text{alog} \left(\frac{(C/X)_o}{10} \right)} = \frac{1}{\text{alog}(3)} \approx 0.001;$$

$$CXs = \frac{1}{\text{alog} \left(\frac{(C/X)_{SATADY}}{10} \right)} = \frac{1}{\text{alog}(2.8)} \approx 0.001585$$

expresando en dB:

$$(C/N)_D = 10 \log \left[\frac{1}{0.025456 + 0.01585 + 0.001 + 0.001585} \right] \approx$$

$$\approx 13.58$$

Por último, con la suma de estas dos relaciones de portadora a ruidos

Por último, con la suma de estas dos relaciones de portadora a ruidos ascendente y descendente totales, obtenemos la relación C/N total del enlace o valor necesario para que el enlace supere atenuaciones, interferencias y problemas climáticos eventuales.

$$\frac{1}{(CM)_{ENLACE_{TOTAL}}} = \frac{1}{(CM)_U} + \frac{1}{(CM)_D}$$

despejando se tiene:

$$(CM)_{ENLACE_{TOTAL}} = 10 \log \left[\frac{1}{\frac{1}{a \log \left(\frac{(CM)_U}{10} \right)} + \frac{1}{a \log \left(\frac{(CM)_D}{10} \right)}} \right]$$

substituyendo datos se tiene:

$$(CM)_{ENLACE_{TOTAL}} = 10 \log \left[\frac{1}{\frac{1}{a \log \left(\frac{14.8281}{10} \right)} + \frac{1}{a \log \left(\frac{13.58}{10} \right)}} \right] \approx$$

$$\approx 11.15 \text{ dB}$$

6.13 CÁLCULO DEL MÁRGEN DEL ENLACE

El margen está dado por la diferencia entre el valor obtenido anteriormente con la relación (C/N) que consideró los problemas de atenuación, intermodulaciones e interferencias y el valor que se obtenga con la relación (C/N) teórica requerida por el enlace (que toma en cuenta la energía de los bits de la información, la velocidad a que se transmiten y el ancho de banda que emplean):

$$(CM)_{REQ.} = (Eb/N_o) - 10 \log(\text{Velocidad}_{información}) - 10 \log(BW_{empleado})$$

$$(CM)_{REQ.} = (6.6) - 10 \log(128,000) - 10 \log(147,200) \approx 5.993 \text{ dB}$$

esta diferencia deberá ser al menos cero o positiva para indicar que

el margen del enlace es adecuado, esto es:

$$MARGEN_{ENLACE\ TOTAL} = (C/N)_{TOTAL} - (C/N)_{REQUERIDO}$$

$$MARGEN_{ENLACE\ TOTAL} = 11.15 - 5.993 \approx 5.15\ dB$$

Cuando dicho margen es negativo no corresponde a la tasa de bits erróneos previstos en el diseño del enlace satelital y debe incrementarse algún parámetro como el diámetro de la antena, la potencia o buscar componentes que permitan bajar la temperatura del sistema hasta que cumpla con las características del diseño planteado; si el margen está excedido, puede reducirse la potencia y recalcular hasta lograr el valor deseado.

Un buen diseño considera que eventualmente la lluvia sobrepasa la cantidad estadísticamente estimada para la zona y que, el margen asignado al enlace puede soportarla, sin detrimento mayor de la calidad del mismo y se cumple con la disponibilidad prefijada, por ejemplo del 99.99%, con la cantidad de lluvia excedida del 0.01%.

La disponibilidad anterior implica que el enlace soportó la atenuación causada por el exceso de lluvia, que hubo con referencia a la cantidad acumulada de lluvia que estadísticamente corresponde al total de horas del 0.01% de un año, es decir, para la lluvia que se acumuló, día tras día en 3.65 días, es decir:

$$(365\ \text{días})(24\ \text{horas/día})(0.01) = 88\ \text{horas}$$

Dichos valores estadísticos han sido calculados y expresados mediante contornos geográficos en los distintos continentes bajo nomenclatura de letras por áreas según Crane y la CCIR .

6.14 POTENCIA CONSUMIDA POR PORTADORA EN EL SATÉLITE

Está dada por la expresión siguiente:

$$\% POTENCIA = \frac{\{\log^{-1}[PIRE_{SATELITE} - PIRE_{SATURACION} + BO_0]\} \times 100}{10}$$

6.15 POTENCIA CONSUMIDA POR PORTADORA EN EL HPA

La potencia consumida expresada en Watts es:

$$POTENCIA = \frac{\{ \log^{-1} [PIRE_{ET} - G_{T_x} + L_{HPA_{Y_{ANT}}}] \}}{10}$$

6.16 POTENCIA CONSUMIDA EN EL HPA DE LA ESTACIÓN MAESTRA

Para la estación maestra se suma las potencias de las portadoras de cada uno de los enlaces de la red.

6.17 RESUMEN DE METODOLOGÍAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL ENLACE

Control de la potencia de subida/bajada	Se emplea con portadoras únicas, pues en caso de multiportadoras genera problemas de interferencia. Este control se puede hacer automáticamente en loop cerrado o en forma de loop abierto con base en la potencia de la señal, el beacon o monitoreo con radiómetros y estimación de temperaturas de ruido.
Utilización de haces múltiples más angostos que cubran con mayor potencia los lugares afectados.	Durante los periodos de atenuación severa, se conmuta hacia antenas de haces más angostos y de mayor ganancia con lo cual se incrementa la PIRE en un área dada.
Construcción de telepuertos en zonas áridas, enlazados vía fibra con zonas de potencial riesgo.	Esto implica a construcción de una red de estaciones terrenas enlazadas, instaladas en lugares de menor precipitación pluvial.
Transmisión diferida de datos una vez pasado el hidrometeoro.	Esta técnica es recomendable cuando no es crítico el manejo de la información en tiempo real.
Utilización de códigos FEC adaptivos acordes al problema.	Se emplea con redes TDMA, combinadas con reducción en la tasa de la ráfaga binaria y proceso a bordo del satélite en algunos casos, con lo cual se recupera hasta 10 dB de atenuación pues se reduce sustancialmente el BER.
Utilización de frecuencias alternas más bajas.	Requiere de satélites híbridos que operen en varias frecuencias con capacidad de respaldo para conmutar por ejemplo de 14/12 GHz o 30/20 GHz a 6/4 GHz en donde es más fácil controlar los márgenes de atenuación por lluvia pues esto es despreciable en esas bandas.
En algunos casos tal vez sea factible la combinación de algunas de las técnicas anteriores para un mejor desempeño.	

RESULTADOS
Y
CONCLUSIONES

A) RESULTADOS Y CONCLUSIONES SOBRE EL CONTENIDO

Se elaboró una investigación teórica con la consiguiente recopilación de información actualizada que incluye lo más importante de la tecnología satelital y sus aplicaciones, misma que presenta metodológicamente el análisis y cálculo del enlace satelital geostacionario, asimismo, el análisis y cálculo con los modelos de atenuación por lluvia, del contenido se comenta que:

El capítulo I da una panorámica de las bases de la tecnología satelital y las principales aplicaciones que tienen actualmente los satélites, remarcando su importancia en el contexto mundial de las telecomunicaciones.

El capítulo II describe todos los elementos operativos de las redes satelitales en general, sus segmentos y cada uno de los subsistemas que conforman un satélite, comentando los avances más recientes en cada una de ellos, en especial en lo referente a antenas, nuevos métodos de propulsión, avances en el sistema de alimentación eléctrica y fotoceldas. También se describe a detalle las características de las órbitas con las ventajas y desventajas de los distintos tipos de satélites que las ocupan. Además se hace la presentación de los principales centros de lanzamiento en cada uno de los continentes. Por último se describen las técnicas de multiplexaje, modulación y acceso al satélite incluyendo también sus ventajas y desventajas.

En el capítulo III se da un bosquejo panorámico de los antecedentes históricos de los satélites, así como de el desarrollo de las comunicaciones satelitales en México, las características y aplicaciones de los satélites mexicanos.

Dado que toda comunicación a distancia a través de la atmósfera sufre los embates de la dinámica atmosférica, con sus épocas de lluvia, en el capítulo IV se describe los fenómenos atmosféricos que impactan a las telecomunicaciones en general y, en particular a los enlaces vía satélite y la atenuación que ocurre como consecuencia.

En el capítulo V se considera el papel que tienen algunos de los modelos para el cálculo de atenuación por lluvia, su aplicabilidad y problemas para en caso de la república mexicana.

El capítulo VI se dedica al análisis teórico/práctico del enlace con el satélite geoestacionario, considerando una metodología que indica desde los cálculos preliminares hasta la obtención del margen de atenuación que exige Satmex para autorizar las frecuencias de operación respectivas.

Por último se presentan resultados y conclusiones de la investigación rrealizada, la instalación y puesta en operación del enlace, pruebas realizadas y comentarios respecto a los resultados obtenidos con los modelos para el cálculo de atenuación por lluvia.

Como resumen se puede decir que la tecnología ha avanzado en todas las áreas satelitales, sin embargo quedan retos para mejorar diversos aspectos, en especial:

- Antenas,
- Sistema eléctrico: baterías y celdas solares,
- Modelos de atenuación por lluvia.

B) RESULTADOS CON RESPECTO A LA INSTALACIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN DEL ENLACE GEOESTACIONARIO

Se instaló los equipos correspondientes a las antenas de 3.8 m. y de 2.4 m. A continuación se muestra las fotografía de las obras realizadas para la primera de las estaciones (fig. A1):

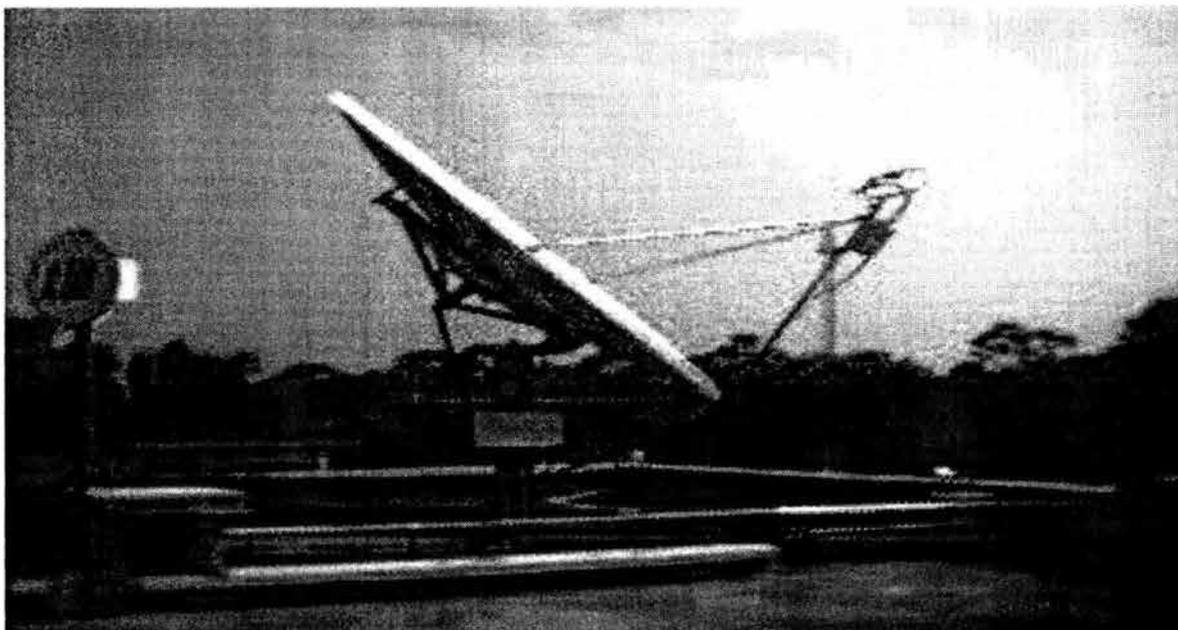


FIGURA A1. ANTENA OFFSET DE 3.8

C) RESULTADOS SOBRE LAS PRUEBAS REALIZADAS

Los resultados y serie de actividades realizadas para la puesta en operación de la estación terrena con antena de 3.8 m. se enlistan a continuación:

- La obra civil en la azotea se tramitó y con la dirección de Obras de la UNAM, realizándose el cálculo estructural con el peso de una estructura de viguetas de acero ancladas en la losa más el peso propio de la antena. Los peritos de la DGO determinaron que no había ningún problema con todo el peso adicional.
- Con el proveedor se coordinó la instalación de la estructura de soporte y la instalación de la antena, misma que fue trasladada vía escaleras, se regresaron dos de los pétalos por presentar daño, posteriormente se volvieron a recibir y se ensambló en la azotea.
- Con el departamento de mantenimiento de la Facultad se solicitó y coordinó la instalación de la obra de alimentación eléctrica requerida para los equipos de la estación terrena. Además, se tramitó la instalación de reguladores para todo el piso.
- Con el proveedor se tramitó la donación de un rack para colocación del modem satelital y se adquirió una unidad UPS de alimentación ininterrumpible; por último se coordinaron los trabajos y pruebas previas para la puesta en operación.
- Con la DGSCA se solicitó la asignación de las frecuencias de subida y bajada para la operación de la estación. La frecuencia asignada de subida fue 14069.95 MHz. Para la antena de 3.8 m y de 14069.75 para la de 2.4 m.
- Hasta la fecha se ha estado solicitando el software para activar el multiplexor. El proveedor indica que es muy difícil conseguirlo pero que lo está buscando. Nunca contó con el mismo y el equipo está discontinuado. Se le ha solicitado un cambio físico.

Los resultados y serie de actividades realizadas para la puesta en operación de la estación terrena con antena de 2.4 m. son las

siguientes:

- Los trámites para la donación de dicha antena y equipo asociado por parte de la DGSCA duraron cerca de tres años. Una vez autorizado el trámite, se viajó al Instituto de Astronomía en la Ciudad de Morelia, se desmontó la antena de la azotea del Instituto, se desconectaron transmisor modem y multiplexor y se les traslado al edificio Valdés Vallejo.
- La obra civil necesaria para su colocación en la azotea se tramitó con el departamento de mantenimiento de la Facultad. El peso menor de esta antena no requirió de cálculo estructural con viguetas adicionales, misma que a continuación se muestra su fotografía (Fig A2):



FIGURA A2. ANTENA DE 2.4 m.

- El equipo se encontró dañado y con la ayuda del Ingeniero Mario Ibarra se hicieron pruebas y se reconstruyó la fuente que estaba totalmente dañada. No obstante el daño en el

radio no pudo repararse y está en trámite su compostura con Vitacom.

- Se han solicitado copias de los manuales a la DGSCA.
- Con el enlace completo, de subida y bajada del satélite, se espera realizar diversas mediciones prácticas, comprobando los cálculos de enlace y de atenuación.

PRUEBAS REALIZADAS CON EL EQUIPO Y ANTENA DE 3.8 m.

Se realizó la programación de las frecuencias autorizadas por DGSCA para el equipo de la antena de 3.8 m:

SUBIDA EN 14069.95 MHz. en la antena de 3.8 m.

BAJADA EN 14069.95 - 2300 MHz.

PENDIENTE:

SUBIDA EN 14069.75 MHz en la antena de 2.4 m.

BAJADA EN 14069.75 - 2300 MHz.

En virtud de que SATMEX ofreció para experimentación el satélite Morelos 2, en órbita inclinada, se realizó lo siguiente:

Cálculos preliminares para su apuntamiento, mismo que se realizó exitosamente, no sin dificultades, debido a la inestabilidad de la órbita. El seguimiento se hizo durante varias semanas a diversas horas, monitoreando el nivel de la señal enviada y recibida. También se realizaron cálculos preliminares para los satélites SATMEX5 y Solidaridad 2.

Prácticas de apuntamiento los satélites: Morelos 2, SATMEX5 y SOLIDARIDAD 2, con los alumnos de la asignatura de "Temas Especiales de Telecomunicaciones" y de la asignatura "Microondas y satélites".

Medición del retardo de la señal y comprobación de los cálculos correspondientes.

Medición del nivel de la señal que se envía y del nivel de la que se recibe.

D) COMENTARIOS RESPECTO A LOS MODELOS PARA CÁLCULO DE ATENUACIÓN POR LLUVIA

Se alimentó a varios de ellos con los datos asociados a la Ciudad de México y se concluye lo siguiente:

Es necesario contar con estadísticas confiables de diferentes lugares para alimentar a dichos modelos.

La variable fundamental en todos los modelos es la altura de la isoterma de cero grados y, dado que su valor se asigna de manera distinta y rígida en ellos, los resultados difieren entre sí. Se sugiere se elabore un nuevo modelo que modifique dicho parámetro con base en la presión atmosférica, la época del año o que considere la altura estimada de la isoterma en el lugar específico que se estudie.

Se concluye que la atmósfera presenta un comportamiento completamente cíclico pero aleatorio en cuanto al momento de ocurrencia de los hidrometeoros, en donde se tiene la certeza de que estadísticamente se puede obtener los valores promedio que ocurren de lluvia, sin embargo, no se sabe con certeza cuando ocurrirán los valores máximos y sólo se puede estimar su probabilidad según la época del año.

Con todo lo expuesto anteriormente se demuestra y comprueba que los modelos para el cálculo de atenuación por lluvia son válidos únicamente para los lugares donde fueron elaborados, con sus condiciones específicos de latitud, longitud, cercanía y altura sobre el nivel del mar.

Se comprueba también que la climatología de cada región es muy particular de una ubicación específica, altura sobre el nivel del mar y orografía asociada; por consiguiente es necesario desarrollar o modificar los modelos de cálculo de atenuación por lluvia considerando preferentemente las estadísticas del lugar, pues los modelos existentes fueron desarrollados con otras condiciones.

Se comprueba también que todos los modelos consideran que la altura de la isoterma de cero grados tiene un comportamiento totalmente predeterminado únicamente por la latitud y longitud del lugar y no se toman en cuenta otras variables que modifican también su altura, lo cual es necesario considerar.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
COORDINACIÓN DE SERVICIOS ADMINISTRATIVOS CAMPUS MORELIA

ACTA DE ENTREGA

----- En Morelia, Michoacán, siendo las catorce horas del día cuatro de junio de dos mil tres, reunidos en la Coordinación de Servicios Administrativos del Campus Morelia de la UNAM, ante la presencia del Lic. Raymundo Rodríguez Salgado, Coordinador de Servicios Administrativos, comparece, el Ing. Fernando Solórzano Palomares, adscrito a la Facultad de Ingeniería de la UNAM, a efecto de dar constancia de los siguientes hechos:-----

----- **En uso de la palabra el Ing. Fernando Solórzano Palomares, manifiesta:** Que por acuerdo de la Facultad de Ingeniería, concretamente de la División de Ingeniería Eléctrica con la Dirección General de Servicios de Cómputo Académico, con la finalidad de continuar con la ampliación de las redes de telecomunicaciones, en el edificio Valdés Vallejo de la Facultad de Ingeniería, solicitamos la entrega de la estación terrena instalada en el edificio A del Centro de Investigaciones en Ecosistemas ubicado en el campus Morelia de la UNAM. Siendo todo lo que tengo que manifestar -----

----- **En uso de la palabra el Lic. Raymundo Rodríguez Salgado, manifiesta:** Toda vez que es un equipo bajo resguardo de DGSCA, no existe inconveniente en hacer entrega del bien antes señalado por el Ing. Palomares, ya que dicha estación terrena no es operada por ninguna dependencia en el Campus y está bajo resguardo de DGSCA, además de que no tiene número de inventario. Siendo todo lo que tengo que manifestar. -----

----- Con lo anterior, se da por concluida la presente, previa lectura que de la misma hacen los que en ella intervinieron, ratificando sus respectivas declaraciones, firmándola al margen y al calce, para constancia y efectos legales procedentes.-----

----- C O N S T E -----

**LIC. RAYMUNDO RODRÍGUEZ
SALGADO
COORDINADOR DE SERVICIOS
ADMINISTRATIVOS EN MORELIA**

**ING. FERNANDO SOLÓRZANO
PALOMARES
FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNAM**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFIA

"A prediction model that combines rain attenuation and other impairments along earth space paths"

IEE Trans. Antennas Propagation. Vol 45, no 10
1997

"Satellite Communication Systems"

Evans B.G.
IEE, United Kingdom
1999

"Some European Satellite Antennas Developments and Trends"

Roeder A. G.
Antennas and Propagation Magazine, vol 38
April 1996

"Sistemas de Comunicaciones Electrónicas"

Tomassi Wayne
Prentice Hall Mexico
2001

"Propagation Effects Handbook for Satellite Systems design

(NASA reference Publication 1082(03), National Aeronautics and space administration, Washington, DC, June 1983

"Análisis de superficies corrugadas para síntesis de patrones de radiación"

Macias Demetrio
junio de 1998

"Satellite Communications System"

Maral G. Bousquet
John Wiley & Sons
1993

"Satellite Communications"

Roddy Dennis
McGraw Hill, second edition,
1996

"Satellite Communication Systems"

Richharia M.
McGraw Hill, second edition,
1999

"Sistemas de Telecomunicaciones vía satélite"

James Wood
Ed. Paraninfo 2001

"Digital satellite Communications technology"

INTELSAT
1992

"Onboard Switching for ATM via satellite"

IEEE Communications magazine
July 1997

"Digital Satellite Communications"
Trit Ha
Ed Mcgraw Hill International
Second Edition
Singappore 1990

"Analog and Digital Communications Systems"
Roden M.S.
Prentice Hall, Inc
1996

"Distant Education Via Broadcast Satellite,
Viggiano, G Sullivan, Ch., and Wallace M
1995

"Ni-H2/Ni-Cd battery Trade Studies"
NASA GSFC Battery Workshop Proceeddings
1988-1992

"Sistemas de Comunicaciones Satelitales"
Vladislav V. Kravchenkp
Ed. IPN
1998

"Broadband via satellite"
Verma, Sandeep
IEEE, 1998

"Electromagnetic wave propagation through rain"
Crane Robert K.
Wiley series in remote sensing. New York-
1996

"Satellite Onboard Processing for Multimedia Applicattions"
Witig Manfred
IEEE Communications magazine
June 2000

"Ka Band eport Management Summary"
Roger Stanyard and DDT Consultingç
IEEE 1999

Fuentes de información web:

<http://www.globalstar.com>

<http://www.lorl.com>

<http://www.iridium.com>

<http://www.teledesic.com>

<http://www.pegasopcs.com.mx>

<http://www.ee.surrey.ac.uk/personal/L.Wood/constellations>

<http://www.satelliteonthenet.co.uk/white/bbandsys.html>

<http://www.invdes.com.mx>
<http://www.sspamicrowave.com>
<http://www.umtsforum.net/tecnologia.asp>
<http://www.geo-orbit.org>
<http://www.satmex.com>
<http://www.cofetel.gob.mx>
<http://www.sspamicrowave.com>
<http://www.satsig.net>
<http://www.intersputnik.com/company.shtml>
<http://www.anritsu.com>
<http://www.autelsat.com>
<http://www.hughes.com>
<http://www.inmarsat.org>
<http://www.intelsat.com>
<http://www.loralorion.net>
<http://www.panamsat.com>
<http://www.telecomm.net>
<http://www.nasa.gov>
<http://www.itu.int>
<http://www.terrasatinc.com>
<http://www.sct.gob.mx>
<http://www.comsat.com.mx>
<http://www.cft.gob.mx>
<http://www.att.com>
<http://www.ieee-occs.org>

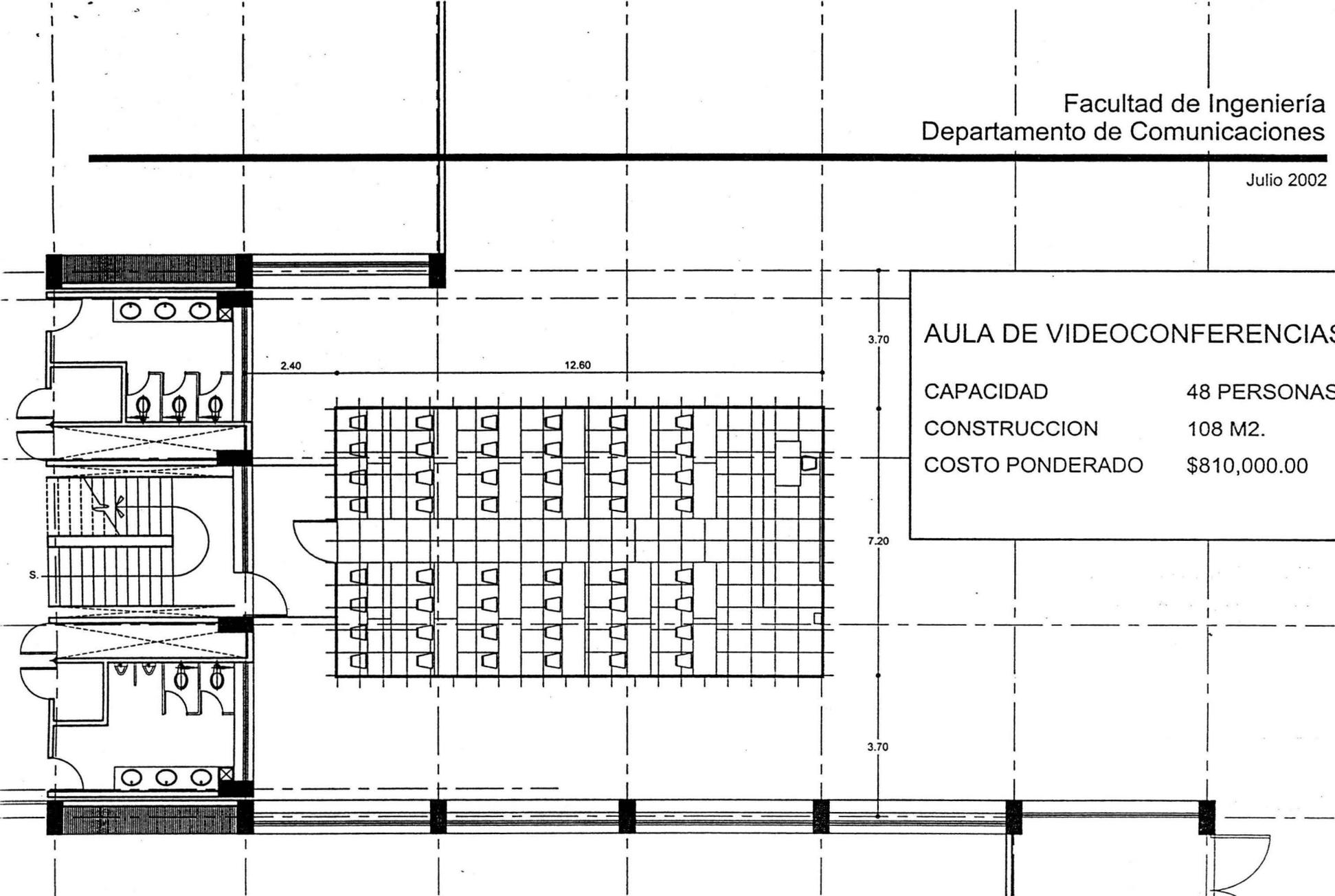
APÉNDICE "A"

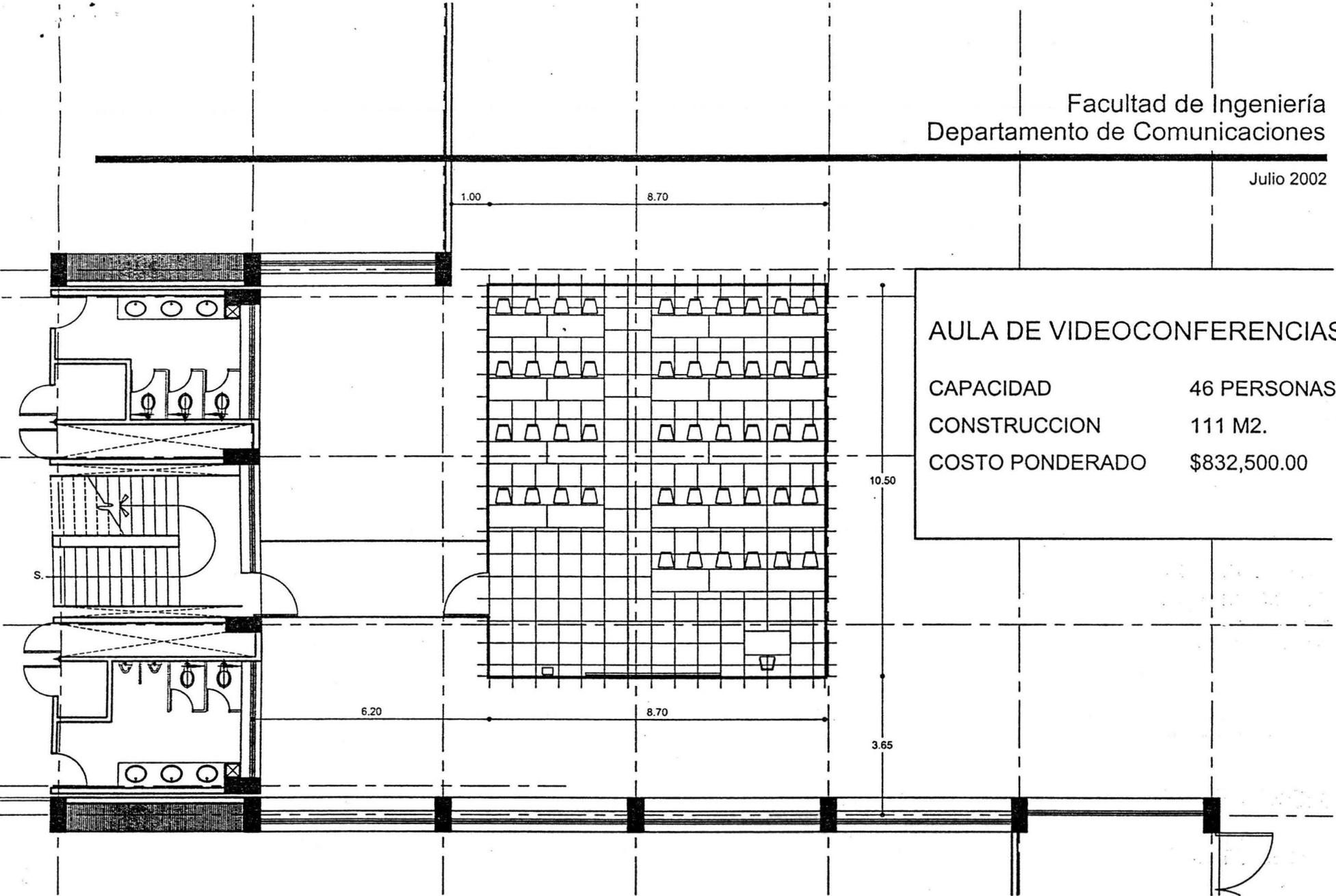
PROYECTO DE

SALA DE VIDEOCONFERENCIA

Facultad de Ingeniería
Departamento de Comunicaciones

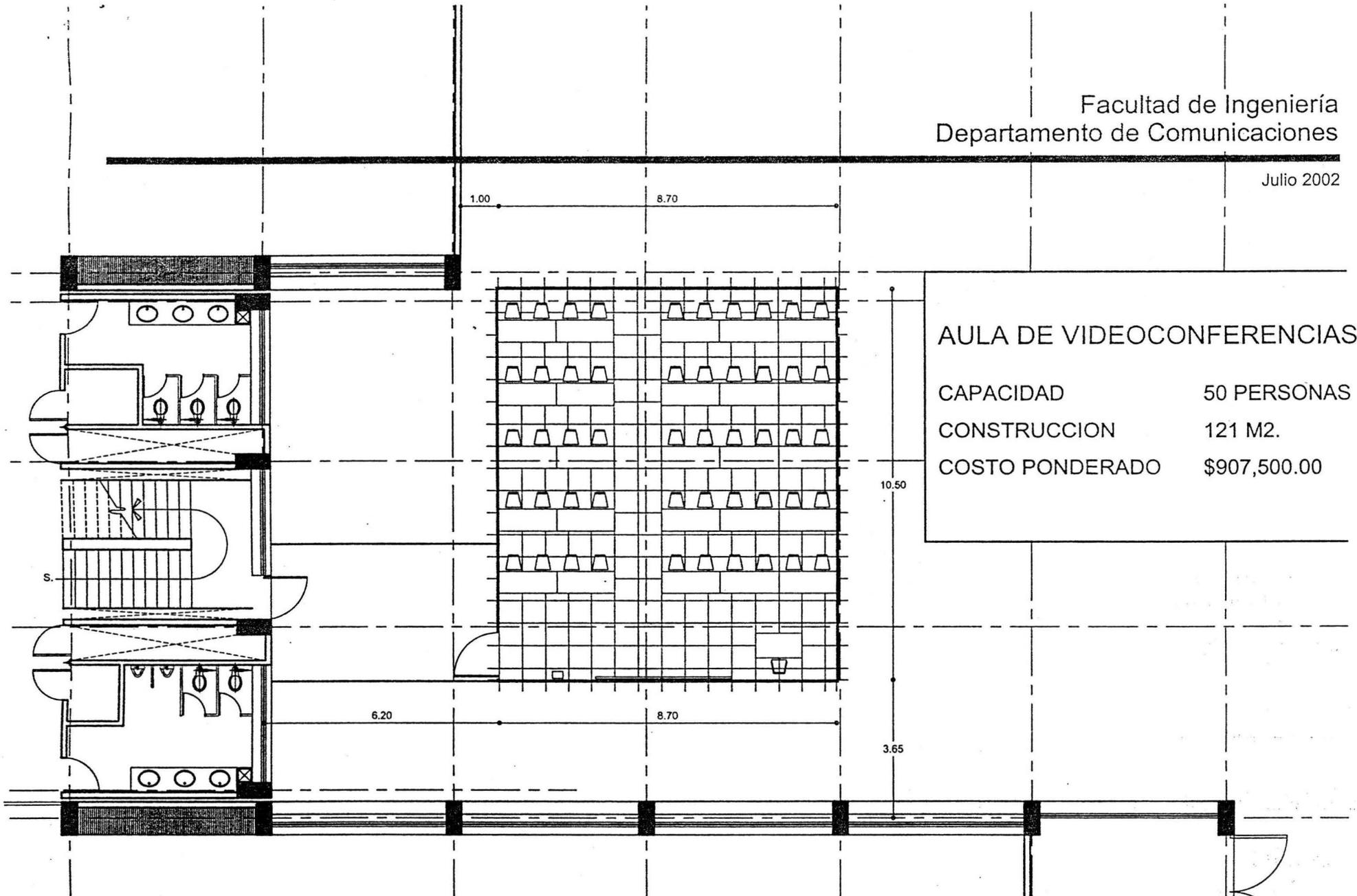
Julio 2002

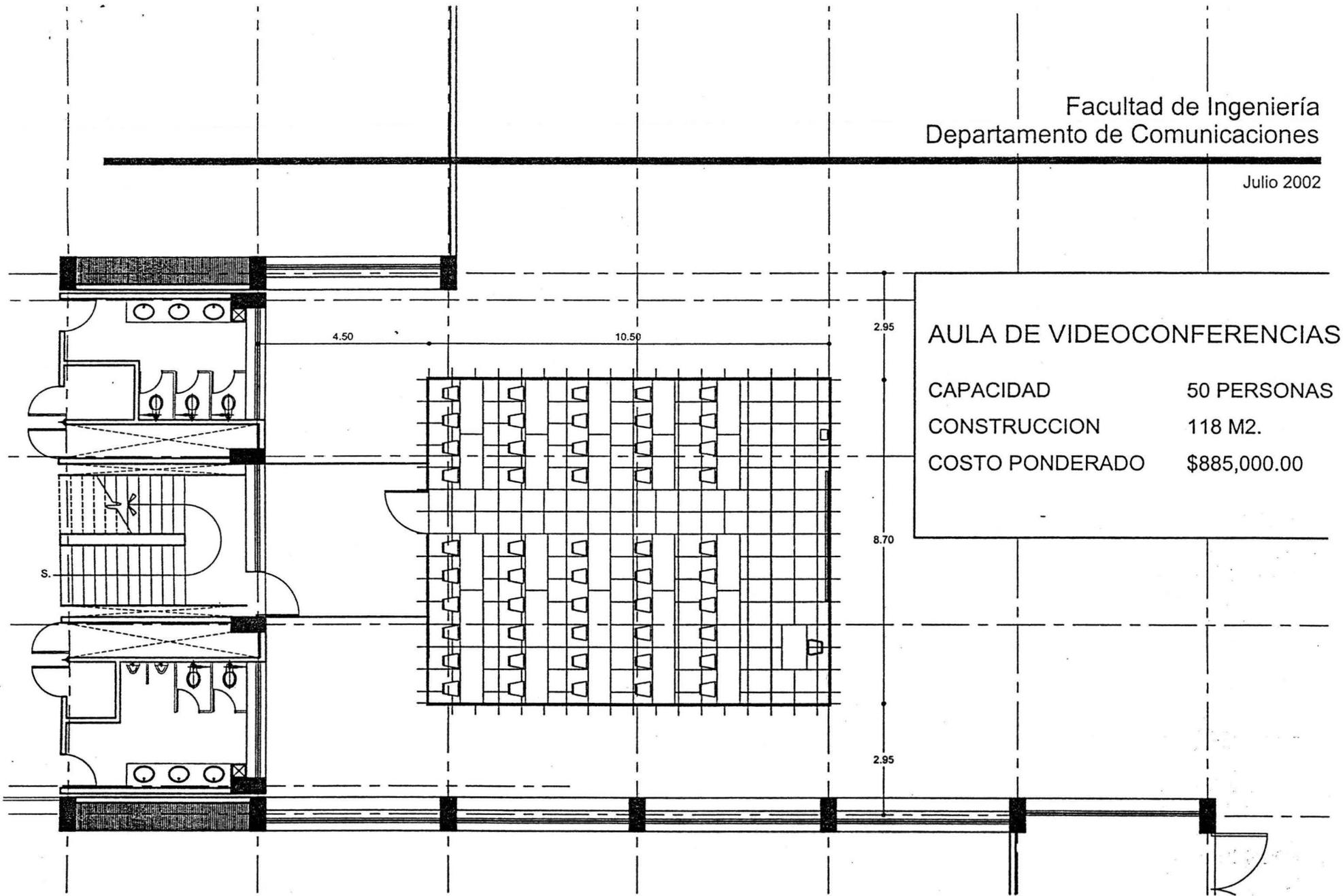




AULA DE VIDEOCONFERENCIAS

CAPACIDAD	46 PERSONAS
CONSTRUCCION	111 M2.
COSTO PONDERADO	\$832,500.00





AULA DE VIDEOCONFERENCIAS	
CAPACIDAD	50 PERSONAS
CONSTRUCCION	118 M2.
COSTO PONDERADO	\$885,000.00

APÉNDICE "B"

DETALLES TÉCNICOS DE

LA INSTALACIÓN DE

ANTENAS

Y

EQUIPOS SATELITALES

B CARACTERÍSTICAS PARA LAS ANTENAS Y EQUIPOS SATELITALES

B.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Para la puesta en operación de una estación terrena, es necesario preparar el lugar donde se instalará la antena y demás equipo para el enlace al satélite, asegurándose que:

- 1) El sitio tiene acceso con espacio suficiente y el lugar o edificio donde se instalará la estación terrena, puede soportar el peso de la estructura de la antena, considerando la velocidad del viento que ocurre ciclicamente en el lugar y que el lugar cuenta con pararrayos.
- 2) No hay obstáculos en la línea de vista al satélite ni obstrucciones en el arco satelital. Esto se debe constatar mediante un estudio de interferencias tanto en línea de vista como en el arco satelital, rotando lentamente una antena de pruebas los 360 grados; al hacer lo anterior se grafica las posibles interferencias en cada una de las polarizaciones empleadas, en caso de que haya interferencias, se anotará el azimut, frecuencia, amplitud y ancho de banda de la portadora detectada, así como la fotografía de la posible fuente; concluido el estudio, se hará un pronóstico a futuro de otras posibles interferencias u obstrucciones (árboles, edificios en construcción o por construirse, etc.).
- 3) El lugar cuenta con buenos accesos y seguridad para el traslado de material y recursos adicionales, que requieran utilizarse en la instalación, como puede ser el caso de una grúa, etc.
- 4) Se elaboran diagramas detallados de instalación eléctrica requerida en el lugar, arreglos de tierras, planos del edificio, ubicación (longitud, latitud y altura), tipo de gabinetes y racks para los equipos, por último,
- 5) Existe en el lugar al menos un medio de comunicación convencional como es la línea telefónica, un radiotransmisor - receptor, etc.

B.2 ESPECIFICACIONES PARA EL CABLEADO ELÉCTRICO

1.- Los cableados se realizan a través de tubos conduit de 2" de diámetro de pared gruesa galvanizada, herrajes de soporte en los extremos, incluyendo 2 corridas de cable belden 9292 y una de cable de 3 pares 24 AWG, proporcionadas por el proveedor del equipo satelital (VITACOM). El largo máximo del cable es de 1000 pies (304.87 m.). La mínima tolerancia para doblar es de 20 pies (3.66 m.) y deberá utilizarse registros en las curvas de la trayectoria del conduit, el cual se remata en el lado de la antena en una mufa que también entrega el proveedor junto con el cable, el otro extremo llega hasta donde se encuentre el rack satelital.

2.- Los cableados de corriente alterna se realizan a través de tubos conduit de 1 ½" de diámetro de pared gruesa galvanizada con herrajes de soporte en los extremos, incluyendo tres cables calibre # 12 AWG para la alimentación de la estación, con dos interruptores de 20A - 120 volts de una fase, rematados en un tablero eléctrico, al que se conectará el UPS. Los interruptores de la estación deberán ser interruptores de 3 cables. Los colores a emplear son de acuerdo con N.E.C.: negro - fase, blanco - neutro, y verde terminal de tierra. Los tableros con interruptores deberán ser de los siguientes tipos:

G.E. : EISO, TEB, TED, THED.
WESTHOUSE: BA, EB, EHB, FS, HFS.
SQUARE "D": EH, FA, IF.

3.- Los registros de paso se instalarán según se requiera y la medida mínima de las cajas es de 36.5 x 36.5 x 18.2 Cm.

4.- Se instalará una caja de contactos para exterior, protegidos de la lluvia preferentemente, en la base de la antena de tipo SQUARE "D" #PAK10C - 1, o un equivalente apropiado.

5.- Los contactos eléctricos serán estandar polarizados, con receptáculo de medida en ampers, con circuitos de corriente eléctrica separados.

6.- Una línea dedicada para contestación automática del modem, conectada a un enchufe RJ-11/C.

7.- La corriente eléctrica tanto exterior como interior será respaldada por un UPS y el tablero eléctrico deberá tener espacio

suficiente para 2 circuitos de una fase polarizados de 20 A. 120 volts que alimentará a la electrónica exterior.

B.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE LA ANTENA

MATERIALES: - Concreto: $C''f = 210 \text{ kg/cm.}$; Acero de refuerzo: $F_y = 4000 \text{ kg/cm.}$

1) se deberá desplantar sobre la losa de concreto, quitando el entortado e impermeabilización existente, escarificando el concreto sobre la losa, amarrando el armado del lecho de la base de la antena al armado de la losa.

2) Una vez colada la base se le deberá impermeabilizar incluyendo el perímetro afectado para evitar filtraciones en la unión con el entortado, así mismo pintarla con pintura reflectiva para azoteas.

3) El emplazamiento de la base de la antena en la azotea debe ser aprobado por un ingeniero civil que conozca y recalcule la estructura de soporte del edificio, para garantizar estabilidad y seguridad.

4) El sistema de terminales de tierra debe incluir una varilla de tierra forrada de cobre, metida en la tierra, con un largo mínimo de 1.28 m., de diámetro por 2.6 m., de largo conectada con alambre torcido de cobre # 6, mediante un enchufe BURNDY #GAR644C y un tornillo de seguridad #31005 para la conexión del mástil.

5) Podrán utilizarse viguetas ancladas en la azotea, soldadas con las varillas de las columnas de carga en caso necesario; Una vez terminada la colocación de las mismas se les aplicará pintura anticorrosiva y se impermeabilizarán las uniones con el entortado de la azotea.

B.4 DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES DE UNA ESTACIÓN TERRENA

B.4.1 OPERACIÓN DEL TRANSCEIVER

Generalmente todo equipo de transmisión posee un circuito de retraso que inhibe la transmisión durante 15 minutos contados desde la energización de la unidad. El objetivo del retraso es permitir la estabilización y evitar la transmisión en frecuencias inadecuadas. También cuando se desconecta la energía por más de dos minutos, se reactiva el circuito de retraso.

B.4.2 GENERALIDADES

El diseño normal de las unidades de RF e IF permite monitorearlas y supervizarlas mediante un controlador externo a través de la interfase serial conectada ya sea con el puerto M&C o con el puerto de mantenimiento. De esta forma se puede ajustar las frecuencias de transmisión y de recepción, etc.

Para el control y mantenimiento puede emplearse el controlador Skydata modelo 5017 o bien una computadora compatible con el software proporcionado por Skydata. Una vez que se instalan las unidades, prueban y programan para su operación normal ya no se requiere la presencia del controlador. La programación de las frecuencias se almacena en una "memoria RAM no volátil" con respaldo de batería que permite reiniciar automáticamente la operación después de una falla.

B.4.3 CONTROL DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN

Las unidades RF/IF cuentan con switches de atenuación y un atenuador ajustable que controlan tanto la entrada como la salida de potencia. Los switches incrementan sucesivamente la atenuación en 4, 8 y 16 dB. El rango del atenuador variable va de 1 a 10 dB en modo lineal. El procedimiento de ajuste para un PIRE adecuado debe realizarse cuidadosamente.

B.4.4 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

La antena recibe las señales en banda Ku (en el rango de 10.95 a 12.75 GHz) y las proyecta sobre el alimentador, de ahí las señales pasan por un filtro de rechazo de transmisión (TRF) que evita una sobre carga en el equipo de recepción. Las señales aceptadas son amplificadas y convertidas a banda L (de 950 a 1450 MHz) dentro de la unidad de RF y enviadas a la unidad de IF para la conversión final a una banda de frecuencias centrada en 70 MHz o 140 MHz según el modelo que se tenga. Las señales convertidas se envían a través de cable coaxial o "interfacility link (IFL)" al equipo instalado en el área de recepción/transmisión. En caso necesario se puede adicionar otro cable coaxial para el transporte de señales de video.

De manera similar las señales a transmitir que se encuentran alrededor de los 70 MHz o de los 140 MHz, viajan por el cable coaxial hacia el equipo externo hacia la unidad de IF donde son convertidas a banda Ku (en el rango de 14000 a 145000 MHz) y a continuación son amplificadas para su conexión al alimentador (en sistemas de 2 a 3 watts). En los sistemas de mayor potencia, la señal proveniente de la unidad de RF se enruta hacia otro amplificador de potencia externo que por lo general puede ser de 8, 16 o incluso un TWTA. El alimentador ilumina la parábola y esta genera un haz delgado que se apunta hacia el satélite.

B.4.4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS CIRCUITOS

Las frecuencias de recepción y de transmisión son controladas por sintetizadores amarrados en fase a una señal precisa de 10 MHz. En el modelo 2452 esa señal de referencia se genera dentro de la unidad de IF. En la versión standard 2451 la señal de 10 MHz se proporciona de forma externa diplexada con la señal de transmisión de 140 MHz. El equipo está diseñado para operar en el rango completo del ancho de banda de los 500 MHz del satélite. La sintonización de la frecuencia se puede realizar en incrementos de 1 MHz.

Dentro de las unidades de Rf e IF los circuitos se encuentran en módulos identificados con las letras A,B,C, etc. Las tarjetas adicionales se identifican por su función.

La tarjeta de monitoreo y control permite las siguientes funciones:

- Programación de las frecuencias de diversos PLL's, incluyendo los sintetizadores de transmisión y de recepción.
- Monitorear fallas en todos los módulos mediante lectura de LED's en caso de fallas.
- Proporciona la interfase serial con los puertos de mantenimiento y M&C. Estas interfases permiten la programación de frecuencias, apagar o encender el drive RF para el monitoreo de condiciones de falla.

El módulo "R" permite la atenuación de la señal entrante mediante los switches y un potenciómetro colocados en el frente de la unidad de IF. De forma primaria este control permite compensar las diversas pérdidas en el IFL y ajustar el nivel de la potencia de salida.

Los 70 o 140 MHz son convertidos en la unidad de RF a 1.3 GHz que son enviados al módulo "K" de conversión hacia arriba. La frecuencia de salida del módulo "K" es controlada por el oscilador local de la unidad IF del sintetizador programable. La señal sintetizada es generada en el módulo D dentro del rango de 898.3 a 1065 MHz de acuerdo a la programación del módulo de control y monitoreo. El módulo de control y monitoreo, a su vez, se programa con las señales del equipo externo. La salida del módulo D se mezcla con la salida del módulo E para producir una señal en el rango de 4.23 a 4.4 GHz. La señal convertida hacia arriba es entonces amplificada por el "Amplificador de Estado Sólido" (SSPA) y enviado al alimentador de la antena.

Las señales recibidas en banda Ku se amplifican en varias etapas especiales de bajo ruido mediante transistores GaAs FET y de ahí convertidas hacia abajo a frecuencias en el rango de 950 a 1450 MHz. La señal en banda L que se obtiene se conecta a la unidad IF en donde se divide en dos trayectorias con el módulo "C". La señal en banda L se conecta directamente al puerto de salida de video. Una parte seleccionada de esa banda se convierte hacia abajo a una frecuencia centrada en los 70 MHz que se conecta al cable coaxial (IFL). El sintetizador que proporciona esta señal de baja frecuencia de la conversión final se puede programar para controlar la banda de frecuencias de recepción. La programación de dicho módulo también se puede realizar con el módulo de control y monitoreo que a su vez puede ser controlado mediante equipo externo.

B.4.4.1.1 DESCRIPCIÓN DE MÓDULOS		
IDENTIFICACIÓN	UNIDAD	FUNCIÓN
A	IF	Convertir la señal de IF (70 o 140 MHz) a 1.3 GHz. Permite prender/apagar la señal a transmitir.
A2	IF	Contiene un filtro de ranura para la frecuencia imagen y amplificación adicional.
B	IF	El oscilador local genera una señal "high side" con incrementos de 1 MHz que el módulo C emplea para convertir la señal recibida en banda L a una señal de 500 MHz.

DESCRIPCIÓN DE MÓDULOS		
D	IF	es un sintetizador que genera LO en el rango de 893.3 a 1065 MHz que emplearán los módulos E y M para, a su vez generar la señal que se usa para la conversión hacia arriba en transmisión.
E	IF	Es un oscilador (PLL) de 3.3 GHz cuya señal se mezcla en el módulo M con la salida del módulo D para proporcionar la referencia de transmisión para la unidad de RF.
G	IF	Multiplica la señal de 10 MHz para generar señales de 300, 600, 800 y 1000 MHz que serán empleados por otros módulos.
H	RF	Bloque "Downconverter" de bajo ruido, amplifica las señales recibidas y las convierte al rango de 950 a 1450 MHz.
J	RF	Amplificador de estado sólido (transmisor de RF).
K	RF	"Upconverter L/Ku" y control de ganancia de compensación de temperatura.
L	RF	Recibe la señal de referencia proveniente de la unidad IF y genera la señal LO para conversión final.

M	IF	"Upconverter/mezclador". Recibe señales de los módulos D y E y genera la referencia en el rango de 4.23 a 4.4 GHz.
Q	RF	Distribuye la potencia de Dc, despliega y resume las fallas de la unidad de RF.
R	IF	Controla el nivel de la señal de transmisión. En el modelo 2451 también separa la señal de 10 MHz de la señal de entrada IF.
U	IF	Almacena y distribuye la señal de referencia de 10 MHz a los otros módulos en la unidad IF.
M&C	IF	Monitorea y controla los demás módulos y es la interfase serial al controlador externo. (programación de frecuencias y monitoreo de fallas).
Expansión M&C	IF	Proporciona entradas y salidas discretas paralelas para control de otros sistemas y del amplificador externo de potencia. (puede faltar en sistemas de baja potencia).
Monitor de fallas	IF	Equipo opcional en sistemas redundantes.

B.4.4.1.1.2 OSCILADOR DE REFERENCIA (MÓDULO G)

Mediante una señal de referencia de 10 MHz, proporciona las siguientes señales a los otros módulos:

- 300 MHz al módulo B
- 600 MHz al módulo C
- 800 MHz a los módulos D y E
- 1000 MHz al módulo A

La detección de fallas se realiza al sensar la corriente extraída por los circuitos y cualquier cambio fuera de lo previsto se interpreta como una falla. La línea de sensado se conecta al módulo de monitoreo y control.

B.4.4.1.1.3 "DOWNCONVERTER" DE BAJO RUIDO (MÓDULO H)

Un filtro paso banda de guía de onda en su entrada evita la sobrecarga del amplificador. Las señales entrantes en banda Ku son amplificadas por las etapas amplificadoras FET de bajo ruido, a continuación son convertidas hacia abajo en frecuencia a una

banda intermedia L de 950 a 1450 MHz. La señal para esta conversión es proporcionada por un oscilador de microondas cristal - estabilizado dieléctrico - reactivo (DRO).

La alimentación de este LNB se realiza con un cable proveniente de la unidad IF.

"Downconverters L/500, 500/(70,140) MHz y Oscilador downconverter PLL de 570 o 640 MHz. (MÓDULO C).

Convierte la señal recibida de 950 a 1450 GHz. hacia la señal final de IF de 70 o 140 Mhz. Este módulo tiene dos funciones:

- "downconversion" de banda L a 500 MHz. El módulo B proporciona la señal LO para la conversión.
- "downconversion" de 500 MHz a 70 o 140 MHz. para obtener la señal final de IF.
- Las señales de 950 a 1450 MHz del LNB se alimentan al circuito divisor y enviadas al conector de video.

El monitoreo de fallas se realiza mediante la detección de la señal del PLL y sensando la corriente extraída de la fuente de +12 V. por los circuitos de conversión hacia abajo.

B.4.4.1.1.4 SINTETIZADOR DE BANDA L (MÓDULO B)

El oscilador local de precisión genera una señal en el rango de 1.45 a 1.95 GHz con incrementos de 1 MHz. que emplea el módulo C. Al monitorear las señales amarradas en fase de cada bloque se realiza la detección de fallas.

B.4.4.1.1.5 AMPLIFICADOR DE ESTADO SÓLIDO (MÓDULO J)

Cuenta con un amplificador FET de tres etapas cuya salida se entrega a un circulador de guía de onda y de ahí a un filtro paso banda para su conexión al OMT. Para mantener constante la ganancia, se monitorea la temperatura y se deriva una señal de control de ganancia para el módulo K.

B.4.4.1.1.6 SINTETIZADOR DE 1 GHz, OSCILADOR PLL DE 3.3 GHz Y "UPCONVERTER" DE 4GHz (MÓDULOS D, E y M)

Permiten subir en frecuencia.

B.4.5 MODEM SATELITAL

Este modem denominado VSAT/SCPC es un modulador/demodulador BPSK o QPSK con portadora en el rango de 52 a 88 MHz. Puede trabajar tanto con sistemas TDMA como SCPC y forma parte del equipo remoto de la estación que opera entre la Unidad del sistema y el paquete externo "Convertidor de subida"/PA/"Convertidor de bajada".

En el modulador PSK la señal en banda base proveniente del convertidor A/D, modula directamente a la portadora. La tasa de operación puede ser de 9.6 kbps (BPSK, tasa $\frac{1}{2}$) o de 1550 kbps (QPSK, tasas $\frac{3}{4}$, $\frac{7}{8}$). Los datos se codifican mediante un código convolucional para la corrección de errores hacia adelante (FEC) con las tasas de $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, o $\frac{3}{4}$, con lo que la señal codificada se obtiene entre 9.6 kbps (BPSK, tasa $\frac{1}{2}$) y 1033 kbps. La codificación convolucional se fija con un factor constante (K) de 7 en el receptor que emplea un decodificador convolucional Viterbi con la misma tasa y factor.

A continuación del FEC opcionalmente hay un codificador diferencial cuya señal de salida se alimenta a la portadora de banda base para convertir las señales de banda base de los canales análogos I, Q en cadenas de datos que modulan a la portadora. El proceso de conversión involucra una tabla de verificación, llave y convertidor D/A. La tabla contiene la versión digital de una función requerida para producir la señal de RF de salida que ha sido mezclada con la portadora. El filtro paso bajas a la salida del convertidor D/A reduce la cantidad de switcheo.

Un PLL genera la frecuencia de 52 a 88 MHz con incrementos de 100 KHz. Además se genera una señal de 1 MHz con ajuste fino de 1 Hz y rango de + -50 kHz, mediante un sintetizador digital directo (DDS) conformado con un NCO y el convertidor D/A. Mediante otro PLL se puede agregar un DDS al incremento del sintetizador y con ello se cuenta con un LO que puede sintonizarse con incrementos de 1 Hz en todo el rango de 52 a 88 MHz.

La señal de banda base ya procesada se mezcla con la portadora generada por el oscilador local para producir una portadora modulada en el rango de 52 a 88 MHz. La señal del oscilador alimenta a los dos mezcladores que se encuentran separados 90 grados uno del otro. En caso de que se use el modo BPSK la señal que se alimenta a los mezcladores es idéntica; si se emplea QPSK

las señales son las componentes I y Q de banda base.

La señal de RF obtenida se alimenta a un filtro paso bajas y se amplifica para producir una señal de 0 dBm acoplada con 75 ohms. El procesador del sistema controla un atenuador que sitúa el nivel de salida en el rango de -5 a -25 dBm. (el atenuador es un conjunto de diodos pin cuyo voltaje se deriva del procesador vía el convertidor D/A de 12 bits). El procesador también cuenta con los datos del voltaje calibración vs. el nivel de salida en el EEPROM.

El único punto de ajuste en el modulador está en el control del nivel de salida del convertidor D/A utilizado para fijar la salida de la unidad de referencia.

En la salida se agregan dos señales más a la portadora modulada que sube mediante cable coaxial al "upconverter". Una de ellas es una señal conmutada de 2.5 MHz o frecuencia de referencia del convertidor, misma que se controla o suprime con el procesador. La señal de 2.5 MHz se produce mediante un oscilador de cristal que generalmente está amarrado a la tasa de bits de la señal recibida desde la estación maestra. La segunda señal es una señal codificada FSK de 300 bauds generada por el modem que puede emplearse con el procesador del paquete externo (RF). El paquete externo emplea este control de interfase para fijar sus parámetros de operación.

Las frecuencias de operación del Modulador y Demodulador generalmente se almacenan en un EPROM para su reuso cuando se reconecta el equipo.

El modulador puede operar de dos diferentes modos: modo continuo para uso SCPC y modo de "ráfaga" para uso en estaciones VSAT. Cuando opera en éste último modo, la señal que se transmite se prende y se apaga de acuerdo al estado de los datos de las líneas del control de interfase y a la información de tramas del flujo de datos. El modo de ráfaga permite que diversas estaciones se enlacen consecutivamente con el demodulador de ráfaga de la estación maestra.

B.4.5.1 DEMODULADOR

Utiliza técnicas de conversión directa para recuperar los datos de la portadora y puesto que no se heterodina, no tiene frecuencia intermedia o proceso (ver fig. 1), la señal RF de entrada se recibe

directamente en el amplificador AGC de recepción. El rango del amplificador AGC excede los 25 dB, permitiendo la entrada mientras se fija el criterio de operación. El nivel exacto de la señal de la portadora depende de la tasa de datos de la señal. Por ejemplo una entrada de 256 kbps ubica el AGC en el rango de -40 a -60 dBm y el doblar la tasa de bits incrementa los límites del AGC en 3 dB tanto en -37 como en -62 dBm. La ganancia de AGC se determina digitalmente y debe producir la salida óptima de los convertidores A/D .

A continuación la señal de RF se demodula mediante un PLL "Costas Loop" en el cual la señal se separa mediante un híbrido de 90 grados en los canales I y Q. En la modalidad BPSK el canal I transporta los datos y el canal Q el ruido y la información de fase de la portadora. En la modalidad QPSK tanto el canal I como el Q transportan datos. Se puede monitorear las señales de esos canales en los puntos de prueba TP45 y TP46.

El oscilador local para demodular utiliza un sintetizador en el receptor en la frecuencia de la portadora que se recibe. El sintetizador se puede sintonizar en el rango de 52 a 88 MHz y tiene dos componentes: Un sintetizador LO con sintonía con paso de 100 KHz y un sintetizador digital directo (DDS) usado para adquirir y rastrear la portadora de recepción. El DDS se puede sintonizar de tres formas:

- 1) con un control fino con incrementos de 1 Hz,
- 2) Un voltaje digitalizado de malla cerrada del detector de fase del Costas Loop y
- 3) el control de barrido generado por el procesador y que se emplea para adquirir nuevas señales.

El procesador controla tanto el rango de barrido, tanto angosto como amplio, dependiendo de la duración de tiempo desde el momento en que atrapa la señal. El barrido amplio permite la adquisición de señales sobre el rango de ± 125 KHz. La mayoría de las funciones del Costas Loop se derivan digitalmente de esta característica. La frecuencia nominal del DDS es de 2 MHz.

Las salidas de los canales de banda base I y Q del demodulador se filtran (tanto de forma fija como variable) y a continuación se digitalizan mediante un convertidor A/D de seis bits. La salida del convertidor se envía al circuito decodificador convolucional Viterbi FEC. Se emplean 4 bits del convertidor A/D para las decisiones

suaves del FEC como una mejora en el desempeño sobre la decodificación de mano dura.

El procesamiento de la señal recibida permite:

- recobrar un símbolo con decisión suave que se alimenta al FEC.
- Recobrar el reloj a partir de la señal de entrada.
- Generar una señal de referencia que fija los 2.5 MHz de referencia del demodulador.
- Determina el estado de malla de la señal recibida.
- Genera la señal de recepción del AGC que determinará la ganancia por etapa de entrada.

El decodificador FEC emplea un único decodificador IC Viterbi, controlado por el procesador.

Se puede habilitar o deshabilitar individualmente un decodificador diferencial y el descrambler INTELSAT(V.35) para la señal de datos que se recibe de forma externa o mediante comandos en la consola y la configuración se puede almacenar en un EEPROM.

La señal de datos recibida y el reloj se convierten a los niveles del rs-449 cuya salida se tiene en J1. El reloj puede emplearse para amarrar la fase del oscilador de cristal controlado por voltaje (VCXO), el cual se divide entre 4 para derivar los 2.5 MHz de la señal de referencia del convertidor.

B.4,5.2 CIRCUITERÍA DE INTERFASE

Resumen de los modos de operación:

MODO	RELOJ GENERADO POR	DIRECCIÓN DE TRANSMISIÓN DEL RELOJ	COMENTARIOS
VSAT	EXTERNO	Al modem vía entrada TT	se supone en malla al recibir el timing después del proceso.
SCPC Slave	El demodulador recibe el bit de timing	Del modem al DTE al transmitir el reloj	Se deriva del SCPC Master

SCPC Master	Reloj del DTE	Del DTE al Modem el dar el timing de la terminal	Enviado al SCPC Slave
SCPC free running	Oscilador interno del modem	Del modem al DTE al transmitir el reloj	Requiere un oscilador interno estable

Estos modos son controlados por el procesador y se establecen mediante la interfase de comandos.

B.4.6 PROCESADOR

Se cuenta con un microprocesador único que administra todas las funciones del monitor, de control y de comunicaciones del modem. Este procesador es un 80C51GB que opera a una frecuencia de 11.0592 MHz. con la que puede realizar la mayoría de las operaciones en 2 microsegundos. Este reloj del CPU se divide para derivar el baudaje de control de las comunicaciones. El procesador emplea direccionamiento externo y buses de datos para conectarse con un EPROM externo que contiene el código de instrucciones. Además emplea RAM tanto interna como externa para todas las operaciones y también es la interfase al Qualcomm FEC, la compuerta de los procesadores del arreglo de señales y demás funciones periféricas. El procesador también mantiene la interfase serial de periféricos que no demandan un acceso rápido, incluyendo el EPROM externo que almacena la información sobre la configuración y los parámetros necesarios para reencender el equipo tal y como quedó la última vez.

El procesador también incluye 8 canales internos de 8 bits del convertidor A/D para reunir información analógica de los puntos de monitoreo incluyendo los voltajes de ajuste del PLL.

La información digital I/O para monitorear y controlar el modem es manejada por los circuitos ASIC DSP y su interfase con el procesador. Los ASIC DSP proporcionan los parámetros involucrados así como la información Eb/No. La información de la configuración se graba a los ASIC DSP's.

El procesador internamente utiliza un UART (Universal asynchronous Receiver/Transmitter) para comunicarse tanto con el RS - 485 como con la consola VT100 que se conecta al modem

PWB. Su velocidad de operación en ambos casos es por default 9600 bauds y está determinada en el código firmware.

El procesador también puede comunicarse con un controlador externo de proceso para las funciones auxiliares a través de un modem FS de 300 bauds, tipo telefónico bi - direccional cuyas señales se multiplexan con la señal que se transmite en el conector de salida de 70 MHz.

B.4.7 CIRCUITERIA ADICIONAL

El modem cuenta con 4 ASIC DSPs que trabajan en conjunto con el procesador. Dos de ellos realizan las funciones de modulación y dos la de demodulación. El FEC puede considerarse como un quinto ASIC DSP. En la tabla siguiente se detalla sus funciones.

En este caso la codificación convolucional no se realiza dentro del FEC IC aunque sea posible. En modo de operación de ráfaga debe establecerse y conocerse el contenido completo del codificador como parte del preámbulo y por consiguiente se realiza dentro del ASIC DSP. Las versiones comunes de los chips Qualcomm Q0256 y Q1650 FEC contienen un error resultante de la operación incorrecta del V.35 Descrambler. Por consiguiente este modo está deshabilitado en el software y sólo se permite en la modalidad "Intelsat".

La alimentación del modem se realiza a través de los conectores P4 y P5 del frente del PWB y se tiene +5VDC, 12VDC y -12VDC. Hay un IC supervisor de potencia en el U59 que monitorea los +5 VDC y "resetea" la computadora cuando el voltaje cae aproximadamente a 4.65 volts. El consumo total de potencia del modem debe ser menor de 30 Watts.

FUNCIÓN	UBICACIÓN	COMENTARIOS
Interfase RS - 449	Discrete U1, 2 y 3	colocado en socket para su reemplazo
Codificador diferencial	FEC	en el FEC
Scrambler INTELSAT(V.35)	FEC	en el FEC
Buffer de transmisión de 56 bits	ASIC DSP - 002	usado en la modalidad de ráfaga
FEC	FEC	Qualcomm Q0256/Q1650
Interfase de transmisión del FEC	ASIC DSP - 002	
Procesamiento de la señal en banda base a transmitir	ASIC DSP - 002	
Modulador conmutable BPSK/QPSK	ASIC DSP - 004	
Atenuador programable discreto	tipo diodo Pin	
Sintetizador de transmisión	Discrete/ASIC DSP - 004	Incrementos de 200 KHz w/DDS a 1 Hz
Sintetizador de recepción	Discrete/ASIC DSP - 003	Incrementos de 200 KHz w/DDS a 1 Hz
AGC y Front end de la IF de recepción.	Discrete	
Demodulador conmutable BPSK/QPSK	ASIC DSP - 003	
Control de recepción de barrido y lock	ASIC DSP - 003	
Control de recepción AGC	ASIC DSP - 003	
Filtro Assy de recepción en banda base	Fixed Discrete Assy	Filtro activo
Circuito de recuperación del bit timing	ASIC DSP - 001	
Generador de referencia de 2.5 MHz	Discrete	
Interfase de recepción FEC	ASIC DSP - 001	
Decodificador diferencial	FEC	
Descrambler INTELSAT(V.35)	FEC	
Doppler FIFO de recepción	ASIC DSP93 - 004	
Procesador de control	Discrete	
Paquete de enlace a RF	Discrete	

B.5 GENERALIDADES DEL MULTIPLEXOR A INSTALAR

	PAD asíncrono para X.3, X.28, X.29	conecta terminales directas o conmutadas a redes públicas de conmutación de paquetes.
	PAD síncrono para SNA/SDL	Soporte a interconexiones de hosts IBM SNA/SDLC
APLICACIONES DEL MULTIPLEXOR	Conmutación de paquetes X.25, direccionamiento X.121, soporte a pasarelas X.25 y X.75	Para uso en ambientes públicos/privados
	Acceso a FRAME RELAY	Da soporte al FRAD (frame relay assembler/disassembler) para transporte de tráfico HDLC Y SDLC.
	Conexión con troncales SFTM (Switched Frame Transfer Mode) y VSFTM	SFTM Para transmisión de paquetes de voz, datos y video, administración de la red; conexión de estaciones de trabajo Sun NetrixView 2000 mediante VSFTM.
Se puede conectar equipos externos que emplean protocolos estándar sin necesidad de múltiples PVCs.		

<p>CARACTERÍSTICAS DE LAS TRONCALES SFTM (SWITCHED FRAME TRANSFER MODE) Y VSFTM DEL MULTIPLEXOR</p>	<p>Permiten:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) una conexión directa con otro modem similar para la transferencia de voz, datos en una sola línea troncal, con la mínima ruta. b) la administración de la red. c) conectarse con la estación de trabajo Sun NetrixView 2000. d) Conectividad de todos contra todos sin necesidad de circuitos privados costosos.
	<p>Como protocolo permite la combinación de los circuitos de voz y datos de los usuarios para transporte a través de la red, evitando conecciones separadas para cada usuario.</p>
	<p>Cuenta con opciones de configuración que influyen en la ruta de la troncal, determinando clases de servicio, tarifas y redes virtuales.</p>
	<p>Las troncales VSFTM permiten controlar el 2210 a través de la red pública o conecciones X.25 y Frame Relay, permitiendo el multiplexaje de voz y datos en una sola DLC para su transmisión en la red.</p> <p>Dan el acceso a:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Redes X.25. b) redes Frame Relay. c) Redes ISDN
<p>Este multiplexor cuenta con una tarjetas procesadoras XPS, un disco duro de 512 Mbytes, lectora de discos flexibles y puerto serie para diagnósticos.</p>	

B.5.1 MANEJO DE TRÁFICO SÍNCRONO O ASÍNCRONO EN EL MULTIPLEXOR

El tráfico puede ir a través del netrix o hacia redes públicas y se maneja a través de tarjetas multiprotocolo denominadas XPn ("puertos XP(entrada/salida)"). Las tarjetas para tráfico de alta velocidad se denominan XP4 y aquellas con puertos de baja velocidad XP8.

B.5.1.1 TARJETA XP4 - 3

Es una tarjeta de alta velocidad que permite la entrada de hasta 4 puertos. La configuración de los puertos síncronos es la siguiente: el puerto uno a 256 kbps, un puerto a 128 kbps y el resto a 64 kbps. El cable de interfase "V.35/X21" en serie con el cable de interfase "V.35/X21", permiten conectar la tarjeta (DCE) con el DTE (dispositivos V.35 o X.21).

B.5.1.2 PAD ASÍNCRONO Y SÍNCRONO DEL MULTIPLEXOR

Estas funciones son realizadas por la tarjeta XP8 - 2, que además proporciona 8 puertos multiprotocolo. El cable de interfase "Octoplex brick - style" incluye una salida "RS232/V.24", para conexión a la tarjeta y un adaptador DCE para la conexión de equipo diverso como terminales de cómputo y modems. Estos puertos son de baja velocidad, el puerto 1 es síncrono a 64 kbps, los otros puertos operan a 19.2 kbps.

B.5.1.3 TARJETAS XP4 - 2

Es una tarjeta de alta velocidad que permite hasta 4 puertos de 64 kbps de modo síncrono y 19.2 kbps en modo asíncrono. Cuenta con 1 Mbyte de memoria RAM y da soporte a diversos protocolos de forma simultánea. Da conexión primaria a redes X.25, Frame Relay y SDLC. Se conecta mediante un cable quadplex de 37 pines para conexión a la tarjeta en un extremo y 4 conectores RS - 232 para los puertos en el otro extremo.

B.5.1.4 TARJETAS XP8 - 2

Su función primaria es como PAD asíncrono y proporciona la entrada de hasta 8 puertos de baja velocidad a través del correspondiente cable, además de funcionar como tarjeta multiprotocolo. Un puerto opera a 64 kbps y los demás a 19.2

kbps. El cable que conecta tiene 80 minipines en un extremo y en el otro 8 conectores RS - 232 para los puertos. Cuando se activa el software de acceso al concentrador se configuran los canales que deben identificar específicamente a los dispositivos que se conectan en los conectores numerados de los 8 puertos; se les puede reenumerar y reclasificar en caso necesario.

B.6 INSTALACIÓN DEL SOFTWARE DE CONTROL DE LA ESTACIÓN

El software asociado al multiplexor, brinda conectividad directa con el multiplexor, se instala en una PC que cuente con CD. Da de alta al suscriptor de paquetes X.25 que comunica al #1 - ISS de la red y el Netrix 2210. Crea la base de datos de la red y una red virtual

pasos iniciales:

Se debe instalar las librerías, directorios necesarios y las variables del ambiente necesarias, así como las rutas correspondientes y se da de alta la base de datos.

Se selecciona el tipo de terminal e impresoras.

Se debe dar de alta como superUser (SU).

Se instala el sistema administrador de la red.

Se da de alta el nodo (número) y se da el boot.

Se da de alta el "Virtual Network View".

Se da de alta en número de red (Virtual Network Id).

En el modo "Create" la pantalla se ilumina en verde, se crean las bases de datos y se puede cambiar los parámetros y eliminar items (delete sin undo).

El "Switch" permite seleccionar entre varias opciones, por ejemplo: la información del suscriptor de paquete y dentro de esta conmutar entre la interfase X.25, Compuerta X.75, o la compuerta DDN X.25.

El "Keyboard Entry Elements" permite datos de 20 caracteres y acepta comandos básicos de edición. De ahí se pasa a la información general para cambiar nombres de unidades, selección de iconos, primitivas, copiar defaults, etc. Se pasa a componentes y sus detalles. Por último se actualiza y escribe la configuración.