

221

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS  
SATELITALES DE COMUNICACIONES MÓVILES EN  
ÓRBITAS BAJAS, INTERMEDIAS Y LA GEOESTACIONARIA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES  
P R E S E N T A:  
ISIDRO FARFÁN SAMPERIO

DIRECTOR: DR. RODOLFO NERI VELA

258758

CIUDAD UNIVERSITARIA D.F., MARZO 1998.





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 está 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.

## OBJETIVO

El objetivo principal de la presente tesis, radica en tener un panorama integral y actualizado de los nuevos sistemas y constelaciones de satélites para comunicaciones móviles que están surgiendo en el mundo y que tendrán mucho auge a principios del siglo XXI así como la implantación de las nuevas terminales de sistemas satelitales ya funcionales que competirán por los usuarios de comunicaciones móviles mundiales.

Deseo agradecer sinceramente a todos aquellos quienes han participado directa e indirectamente en el continuo y a veces tedioso proceso de mi educación. De manera muy especial deseo dedicar esta tesis a quienes me han brindado los valores más importantes en la vida:

A mis padres - Gracias por ser un ejemplo de continua superación, por darme la vida, su cariño, apoyo y comprensión, por los esfuerzos que seguramente afrontaron para proporcionarme una educación, pero sobre todo, gracias por ser mis padres.

A Móni - Móni, me resulta sumamente difícil el pensar que no pudiera agradecerte, sinceramente has sido en mi vida más de lo que pudiese haber imaginado, así que sólo quiero resaltar el enorme amor, apoyo, comprensión y confianza que de ti recibo. Gracias.

A mis hermanos - Gracias enanos por las travesuras, juegos, aventuras y regaños que hemos compartido, por su apoyo incondicional y por sus nobles deseos

A la familia Nocetti Gutiérrez - Gracias por siempre ofrecerme su apoyo y confianza, por invitarme a compartir los momentos más importantes de su vida y considerarme uno de ustedes.

A el Dr. Rodolfo Neri Vela - Gracias doctor, por su amistad, por los interesantes y valiosos conceptos que tuvo a bien compartir, por el interés en la dirección de esta tesis y muy en especial por la enorme confianza que tuvo en mi desempeño.

A la Universidad - Mi más sincera gratitud por brindarme no sólo el apoyo de sus instalaciones, necesarias para la comprensión de los temas de telecomunicaciones, sino por reunir a profesores eméritos en la materia, y ser una verdadera comunidad cultural que facilita elevar el conocimiento de quienes formamos parte de ella.

# CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1. UTILIDAD DE LOS SATÉLITES DE COMUNICACIONES MÓVILES</b> .....	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 TELEFONÍA CELULAR TERRESTRE .....	3
1.2.1 Generalidades .....	3
1.2.2 Principales subsistemas celulares .....	7
1.2.3 Operación de un sistema celular .....	13
1.3 SISTEMAS SATELITALES DE COMUNICACIONES MÓVILES .....	15
1.3.1 Órbitas para comunicaciones móviles .....	15
1.3.2 Principales sistemas satelitales de comunicaciones móviles .....	17
1.4 SISTEMA MÓVIL SATELITAL VS SISTEMA CELULAR TERRESTRE .....	19
1.4.1 Diferencias de cobertura .....	19
1.4.2 El principio celular de los sistemas móviles satelitales .....	22
<b>2. ANÁLISIS HISTÓRICO DE LOS PRIMEROS SISTEMAS SATELITALES DE COMUNICACIONES MÓVILES</b> .....	<b>27</b>
2.1 DESVENTAJA DE LOS SISTEMAS MÓVILES EN HF .....	27
2.2 INMARSAT, EL PRIMER SISTEMA SATELITAL DE COMUNICACIÓN MÓVIL .....	29
2.2.1 Evolución de las terminales móviles de INMARSAT .....	32
2.2.2 Aceptación de INMARSAT .....	43
2.3 OMNI TRACS .....	47
<b>3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ÓRBITA GEOESTACIONARIA</b> .....	<b>57</b>
3.1 ANÁLISIS DE PROPAGACION DE UNA SEÑAL SATELITAL .....	57
3.2 VENTAJAS DE LA ÓRBITA GEOESTACIONARIA .....	62
3.3 DESVENTAJAS DE LA ÓRBITA GEOESTACIONARIA .....	64
3.3.1 Satelización .....	64
3.3.2 Plano ecuatorial terrestre .....	66
3.3.3 Congestión de la órbita .....	67
3.3.4 Altitud de la órbita .....	69
<b>4. SISTEMAS GEOESTACIONARIOS DEL SIGLO XXI</b> .....	<b>75</b>
4.1 INMARSAT .....	75
4.1.1 Configuración espacial .....	75
4.1.2 Principales terminales Inmarsat .....	82
4.1.2.1 Inmarsat-A .....	82
4.1.2.2 Inmarsat-B .....	85
4.1.2.3 Inmarsat-C .....	87
4.1.2.4 Inmarsat-M .....	90
4.1.2.5 Inmarsat-Aero .....	96

4.2 MSAT .....	100
4.2.1 Configuración espacial.....	100
4.2.2 Comunicadores MSAT .....	105
4.3 SOLIDARIDAD .....	112
4.3.1 Configuración espacial .....	113
4.3.2 Servicios de comunicación móvil del sistema SOLIDARIDAD .....	121
4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS GEOESTACIONARIOS EXPUESTOS .....	122
<b>5. ÓRBITAS TERRESTRES BAJAS E INTERMEDIAS .....</b>	<b>127</b>
5.1 ÓRBITAS NO-GEO.....	127
5.2 SISTEMAS SATELITALES LEO Y MEO .....	129
5.2.1 Entorno espacial .....	129
5.2.2 Plataforma satelital .....	131
5.2.3 Constelación satelital .....	133
5.2.4 Reuso de frecuencias .....	138
5.2.5 Enlaces satelitales .....	142
5.2.5.1 Enlaces cruzados ISL .....	146
<b>6. SISTEMAS EN ÓRBITAS BAJAS E INTERMEDIAS DEL SIGLO XXI .....</b>	<b>153</b>
6.1 PLAN DEL ESPECTRO COMPARTIDO EN BANDA L .....	154
6.2 SISTEMAS EN ÓRBITAS INTERMEDIAS .....	155
6.2.1 ICO (Intermediate Circular Orbit) .....	155
6.2.1.1 Configuración Espacial .....	155
6.2.1.2 ICONET .....	158
6.2.1.3 Terminales y servicios .....	163
6.2.2 ODYSSEY .....	165
6.3 SISTEMAS EN ÓRBITAS BAJAS .....	171
6.3.1 IRIDIUM .....	171
6.3.1.1 Constelación espacial .....	172
6.3.1.2 Segmento terrestre y de control .....	177
6.3.1.3 Terminales y servicios .....	181
6.3.2 GLOBALSTAR .....	186
6.3.2.1 Segmento espacial .....	188
6.3.2.2 Segmento terrestre .....	197
6.3.2.3 Enlaces de comunicación .....	201
6.3.2.4 Terminales y usuarios .....	203
6.3.3 ORBCOMM (ORBITal COMMunications) .....	206
6.3.3.1 Constelación satelital .....	206
6.3.3.2 Segmento terrestre .....	210
CONCLUSIONES .....	213
GLOSARIO DE ABREVIATURAS .....	217
BIBLIOGRAFÍA .....	221

## I INTRODUCCION

Con base al objetivo establecido, la tesis se divide en 6 capítulos. El primer capítulo está orientado para resaltar la problemática de una limitada cobertura, presente en los sistemas celulares terrestres y brevemente se menciona cómo es que los satélites pueden sacar ventaja del concepto de comunicación celular. Posteriormente, en el capítulo dos, se analiza la historia de los satélites de comunicación móvil hasta la actualidad, mostrando la evolución de las terminales tanto en capacidad como en portabilidad, con el fin de concientizar cómo desde siempre la mayoría de los usuarios han buscado la portabilidad de la terminal de comunicaciones y la capacidad de servicios personales a nivel mundial.

De manera fundamental, el tercer capítulo resalta las principales ventajas y desventajas de los sistemas satelitales geoestacionarios, mismas que repercuten en los más avanzados sistemas de comunicación comercial de actualidad, como Inmarsat, Msat y Solidaridad, vistos en el cuarto capítulo.

Dando continuidad a las posibles opciones para un sistema satelital de cobertura global y pequeñas terminales portátiles, inducido en el capítulo tres, el quinto capítulo trata los factores más relevantes de los sistemas de órbitas bajas e intermedias, para conocer de manera integral la relativa complejidad que implica su funcionamiento (respecto a los sistemas geoestacionarios), pero a la vez resaltando las ventajas que presentan en la portabilidad de las terminales y sobre todo en la capacidad del hasta ahora limitado reuso de frecuencias en sistemas satelitales.

Finalmente, el capítulo seis está dedicado al estudio de los futuros sistemas satelitales de órbitas bajas e intermedias que no sólo extenderán la cobertura de los sistemas celulares terrestres, sino que formarán un elemento esencial en las redes de tercera generación, pues estos serán vitales para una comunicación personal que rebasa la cobertura de los sistemas terrestres sin proveer, por el momento, capacidades tan elevadas como las que proporcionan las terminales de los convencionales sistemas geoestacionarios.

## 1

## UTILIDAD DE LOS SATÉLITES DE COMUNICACIONES MÓVILES

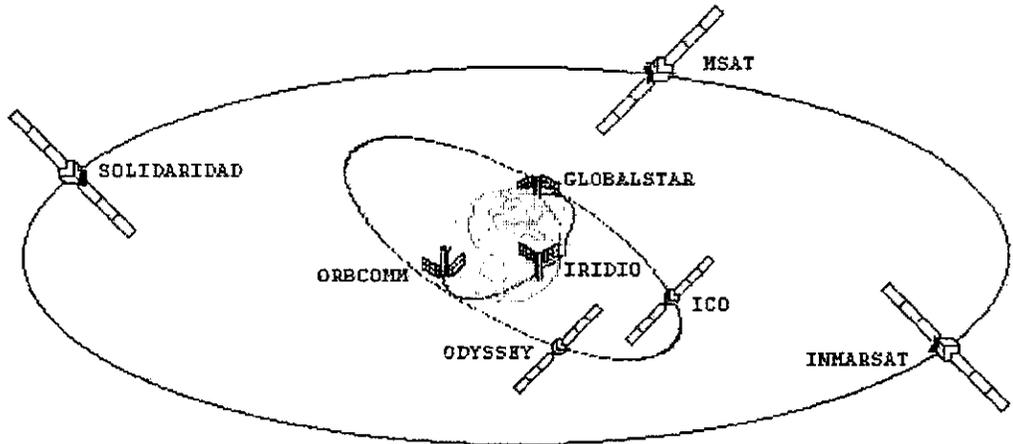
### 1.1 INTRODUCCIÓN

En la medida en que la información se torna esencial para el desarrollo económico, la educación, la atención a la salud, los servicios públicos y en general en todos aquellos aspectos asociados con una mejor calidad de vida, la necesidad de una infraestructura de comunicaciones a nivel mundial adquiere mayor relevancia.

Desafortunadamente, gran parte de la población del mundo carece de muchos de los servicios de información e incluso de los servicios de voz más básicos. Esto se debe a que la mayoría de los actuales sistemas de comunicación están basados principalmente en tecnologías de cable, las cuales requieren fuertes inversiones en infraestructura fija, limitando el desarrollo de aquellas áreas remotas donde la densidad de su población no costea la implantación del servicio, ocasionando a su vez congregaciones urbanas sobrepobladas.

Por ello, al intentar extender la cobertura de los servicios de comunicación, surge la necesidad de complementar los sistemas con tecnologías que permitan proporcionar servicios de información avanzados de manera continua en cualquier lugar y en cualquier instante de tiempo.

Sin embargo, el mayor reto consiste en ofrecer estos mismos servicios aunados a la libertad de movimiento durante la comunicación; por ello, se crearon los sistemas de telefonía celular, y recientemente ha surgido el desarrollo de sistemas satelitales de comunicaciones móviles, tanto en órbitas bajas e intermedias como en la convencional órbita geoestacionaria, destacando entre éstos aquéllos que se indican en la figura. 1.1



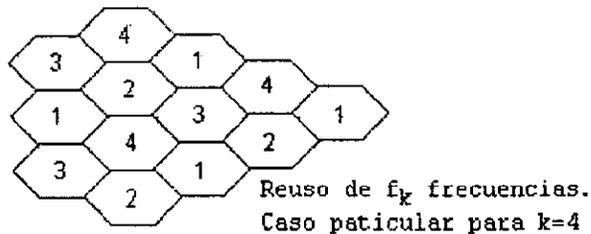
**Figura 1.1** Principales sistemas satelitales de comunicaciones móviles analizados en esta tesis. Los sistemas de órbita baja e intermedia son constelaciones con varias orbitas inclinadas, aun cuando sólo se ilustran un elemento satelital y una órbita tipo en la figura.

Algunos de estos sistemas satelitales de comunicaciones móviles (Inmarsat, Solidaridad y otros) ya funcionan desde hace varios años, otros iniciaron su operación en 1996 (por ejemplo, MSAT) y los demás estarán listos hacia el año 2000. En esta tesis nos avocaremos al estudio detallado de cada uno de estos sistemas y se resaltarán sus diferencias y tipos de servicios. Pero antes de entrar en materia, conviene hacer un breve repaso de los sistemas de telefonía celular terrestre, ya que la mayoría de los sistemas satelitales que se estudiarán en este trabajo (en particular, las constelaciones de órbita baja e intermedia) operan bajo un principio celular similar, pero en el espacio. Cabe aclarar que además de las constelaciones analizadas en esta tesis, hay también otras propuestas por diversas compañías, como son el proyecto Aries, Ellipso, Leosat, Starnet y Vitasat; sin embargo, los sistemas aquí vistos son los que muestran un mayor avance a la fecha en cuanto a financiamiento, construcción de satélites y futura puesta en operación del servicio.

## 1.2 TELEFONÍA CELULAR TERRESTRE

### 1.2.1 Generalidades

El desarrollo de los sistemas telefónicos celulares se debió principalmente a la ineficiente utilización que había del espectro de frecuencias por parte de los sistemas telefónicos móviles convencionales (trunking<sup>†</sup>, VHF\*, UHF\*, etcétera). Debido a que los organismos que administran este escaso recurso se inclinan por otorgar concesiones a aquellos sistemas de telefonía móvil que requieran un mínimo ancho de banda y que a su vez proporcionen gran satisfacción al consumidor y propicien una alta demanda del servicio, la telefonía celular combina la reutilización de frecuencias tanto en el tiempo como en el espacio, lo que a su vez implica el diseño apropiado de células para evitar serios problemas de interferencia entre canales (Figura 1.2). De allí el nombre de telefonía "celular".



**Figura 1.2** Patrón de reuso de frecuencias en un sistema celular terrestre.

<sup>†</sup> Es un sistema para comunicaciones móviles compuesto por radios sintetizados de multifrecuencia, que entre varios canales posibles rastrean automáticamente la presencia de un canal libre y lo emplean para realizar su enlace. Sus frecuencias de operación se encuentran en los 800 y 900 MHz, y recientemente presentan aplicación en canales VHF y UHF.

\* Consúltese el Glosario

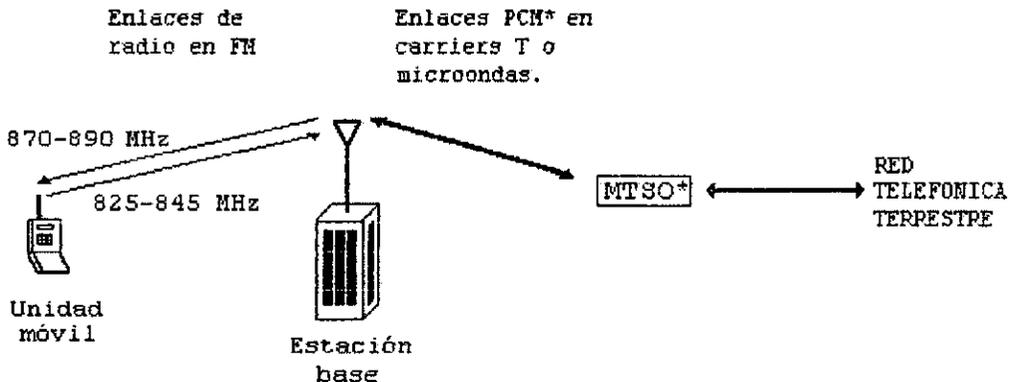
La telefonía celular opera en dos bandas de frecuencias cercanas a los 800 MHz como se aprecia en la siguiente tabla (véase también la figura 1.3).

**Tabla 1.1** Frecuencias de transmisión en los sistemas celulares.

Banda	Unidad Móvil [ MHz ]	Estación Base [ MHz ]
A	825 - 835 (845 - 846.5)	870 - 880 (890 - 891.5)
B	835 - 845 (846.5 - 849)	880 - 890 (891.5 - 894)

Banda adicional ( )

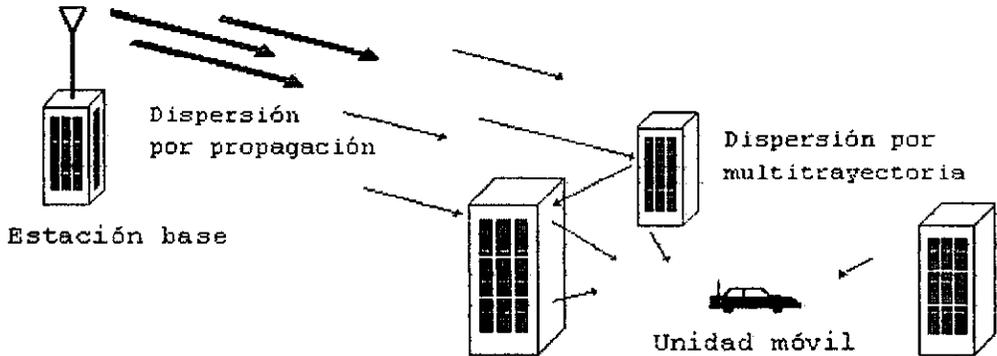
Debido a que los canales de voz requieren un ancho de banda de 30 KHz y una banda de separación de 1 KHz, actualmente se cuenta con 333 canales de voz en cada banda; sin embargo, la asignación de una banda adicional de 5 MHz, 1.5 MHz en la unidad móvil y 3.5 MHz en la estación base, generará un aumento en el número de canales disponibles.



**Figura 1.3** Principales enlaces de un sistema celular terrestre.

Al igual que cualquier onda que se propaga en el espacio, las señales de telefonía celular sufren atenuaciones por espacio libre, distorsiones, desfasamientos por ruido atmosférico, etcétera; sin embargo, el efecto de mayor importancia es aquel conocido como dispersión de Rayleigh ó dispersión por multitrayectoria (Figura 1.4), el cual se debe a la superposición de la señal original de telefonía con ondas estacionarias que se forman debido a reflexiones, refracciones y absorciones de la misma, generadas por los obstáculos que se encuentran cercanos al móvil.

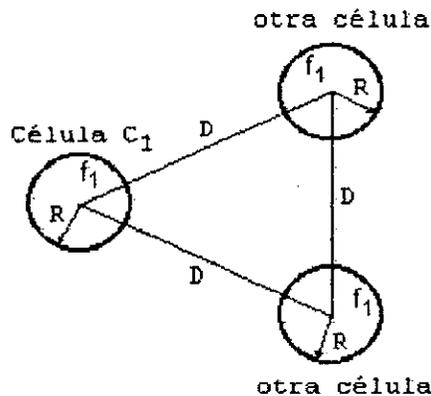
De esta manera, mientras el móvil se encuentre estacionado, siempre recibirá la señal de telefonía alterada por una constante en intensidad, pero si se desplaza, entonces dicha alteración será proporcional a la dispersión en el espacio provocada por las estructuras, y por lo tanto se tendrá una mayor dificultad de reconocimiento de la señal, lo cual conlleva a una menor calidad del servicio.



**Figura 1.4** Efectos de la dispersión en un sistema celular terrestre.

Como se sabe, un canal de radio consiste en un par de frecuencias (una para cada dirección de transmisión) para así poder establecer una comunicación full-duplex<sup>1</sup>. Por lo que, si un canal de frecuencia  $f_1$  es usado para establecer una llamada en una célula  $C_1$  con una cobertura radial  $R$ , este mismo canal de frecuencia  $f_1$  puede ser usado en otra o varias células con la misma cobertura radial  $R$ , siempre y cuando las células estén separadas por una mínima distancia  $D$  (Figura 1.5), la cual depende de muchos factores, entre ellos:

- el número de células próximas a la estación base de interés,
- el tipo del contorno geográfico del terreno, que aun cuando en la realidad no posee obligadamente un contorno determinado, por facilidad de representación gráfica se emplean hexágonos o círculos para cada célula.
- el patrón de radiación de la antena.
- la altura de la antena, ya que a mayor altura las señales puede librar mejor los obstáculos, aun considerando la curvatura de la Tierra,
- y finalmente, la potencia transmitida por cada estación base.



**Figura 1.5** Reutilización de la frecuencia  $f_1$  en un sistema celular terrestre.

<sup>1</sup> Sistema de transmisión de señales en ambos sentidos simultáneamente.

## 1.2.2 Principales subsistemas celulares

Un sistema celular consiste fundamentalmente en 3 subsistemas:

Unidad móvil  
Estación base  
MTSO

A continuación se dará una breve descripción de cada uno de estos subsistemas. La relación entre ellos se muestra en la figura 1.6. Los enlaces de radio transportan las señales de voz y de señalización entre la unidad móvil y la estación base correspondiente, mientras que los enlaces de voz y datos de alta velocidad entre las estaciones base y la MTSO deben usar enlaces de microondas o carriers T, debido a que no pueden ser transmitidos a través de las líneas estándar de telefonía.

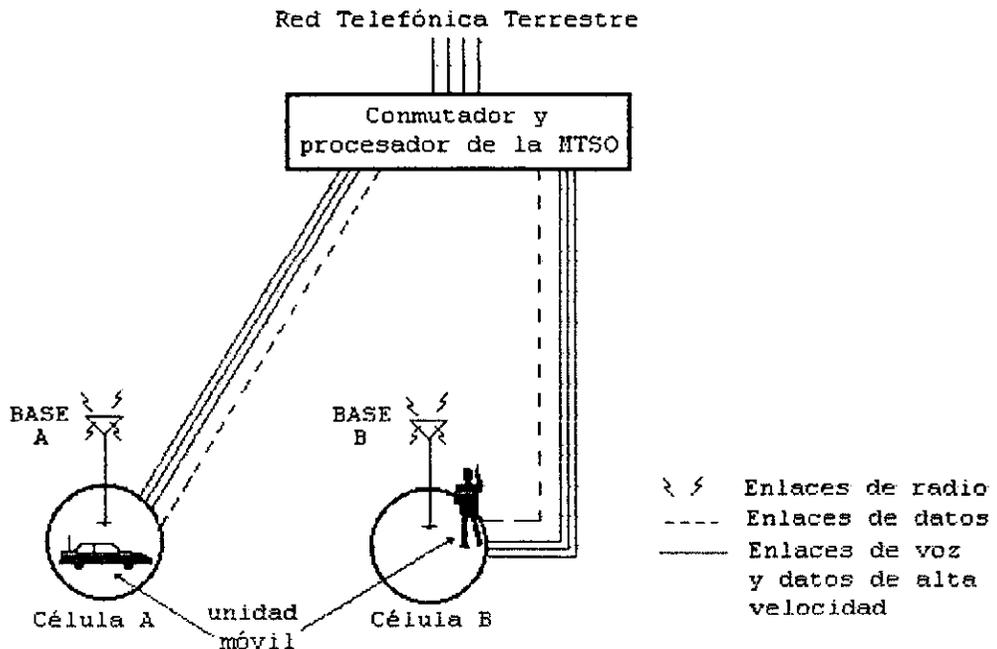


Figura 1.6 Enlaces entre los tres subsistemas celulares.

- **Unidad móvil** - Contiene unidades de control, de trans-recepción y de antena. Las especificaciones técnicas y principales características de uno de los modelos más usados actualmente, se muestran a continuación (Tabla 1.2 y Figura 1.7).

**Tabla 1.2** Especificaciones técnicas de la unidad móvil DPC550 M (Cortesía de Motorola, Inc.)

Cobertura de frecuencia	824.04-848.97 MHz en el transmisor 869.04-893.97 MHz en el receptor
Ancho de banda del canal de voz	30 KHz
Número de canales	832
Espaciado duplex	45 MHz
Estabilidad de frecuencia	± 2.5 ppm
Voltaje de operación	+ 5.2 a + 7.5 volts cd
Tiempo de llamada	hasta 100 minutos continuos
Tamaño	90 cm cúbicos.
Peso	277.2 gramos
Salida de potencia de RF	0.6 watts nominales
Impedancia de entrada / salida	50 Ω nominales
Distorsión de audio	Menos del 5 % @ 1 KHz + 8 KHz
Zumbido y ruido	-32dB para desviaciones de ±8KHz @ 1KHz
Modulación	F3: ± 12 KHz para 100% @ 1KHz
Respuesta de audio	Preénfasis de 6 dB / octava
Protección de sensibilización de canal alterno	-60 dB @ ± 60 dB

@ -- Simbología que indica referencia

F3 -- Clase de emisión. Representa una señal de voz con modulación en frecuencia.

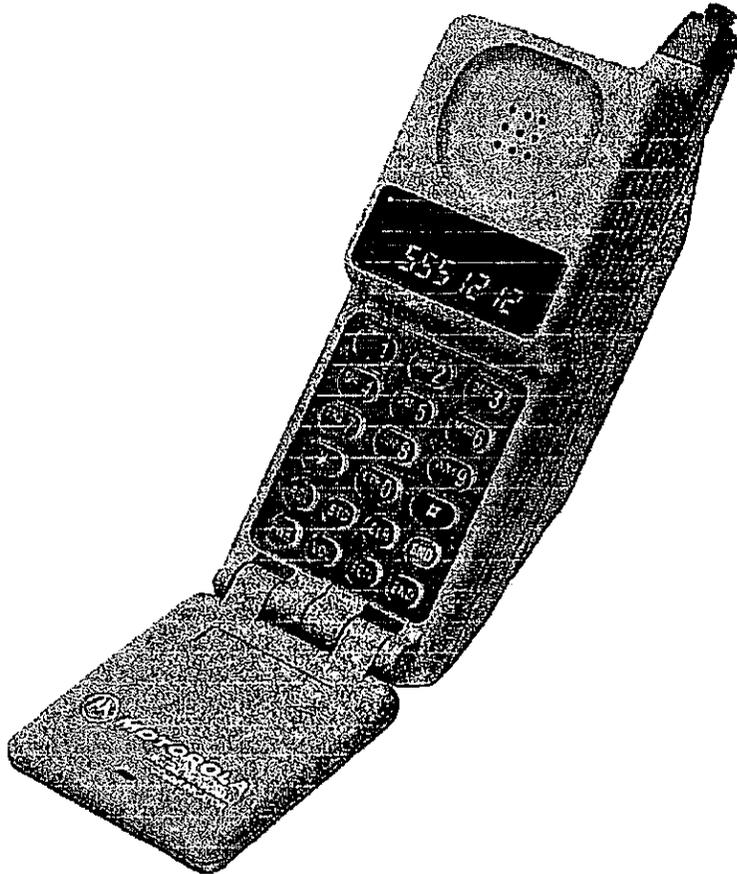


Figura 1.7 Unidad móvil DPC550 M. (Cotesía de Motorola, Inc.)

- Estación base** - Ofrece una interfase entre el centro de conmutación o MTSO (Mobile Telephone Switching Office) y las unidades móviles. Cuenta con capacidad multicanal para conectar simultáneamente a varias de estas unidades móviles con la ayuda de una unidad de control, gabinetes de radio, antenas, planta de poder y terminales para datos (Figura 1.8, véase la Tabla 1.3 para su interpretación).

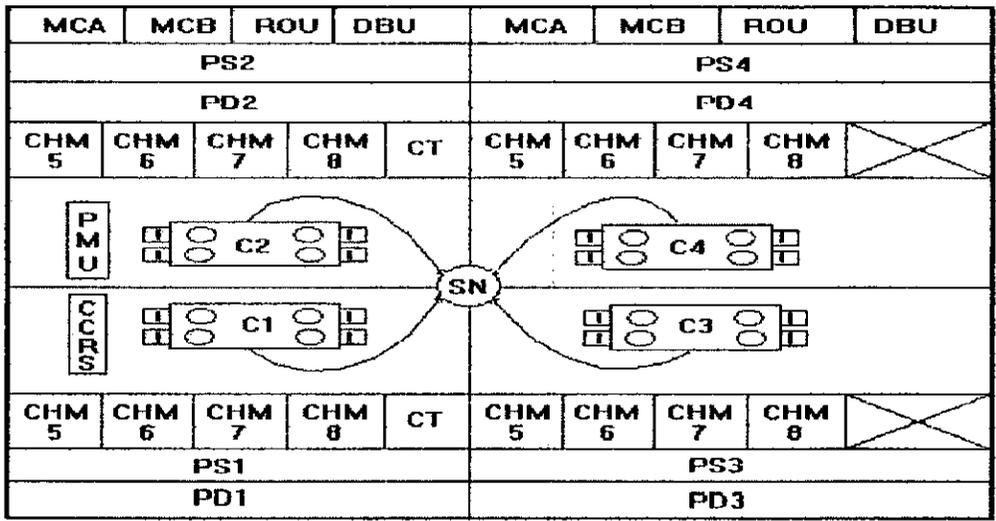


Figura 1.8 Configuración de la unidad de radio de una estación base.

**Tabla 1.3** Elementos de los subsistemas de radio e interfase celular terrestre

C	Combinador
CCRS	Interruptor de canal redundante.
CHM	Unidad de canal
CT	Probador de canal
CU	Unidad de control
DBU	Unidad de distribución
EMRP	Extensión del procesador central
Feeder	Alimentador de la antena
I	Aislador
IOIM	Interface de I/O con la PC.
MC	Multiacoplador
MDF	Multidivisor de frecuencia
MDM	Intermediario para el envío de mensajes
MTSO	Centro de conmutación de telefonía móvil
MUX	Multiplexor
NTX	Central de interconexión para la PSTN*
PD	Distribuidores de potencia
PMU	Unidad de monitoreo de potencia
PS	Derivadores de potencia
ROU	Oscilador de referencia
SN	Red de conexión tipo estrella
STL	Terminal de señalización
STR	Terminal regional de señalización
Tx y Rx	Antenas de comunicación

\* Consúltense el Glosario

- **MTSO** - Es la oficina de conmutación. Realiza la coordinación central de los elementos para todas las centrales celulares. Contiene el procesador y el conmutador celular. Además, crea una interfase con las oficinas de zona de la compañía telefónica, controla el proceso de llamadas y maneja las actividades de facturación. (Figura 1.9, para su interpretación véase la tabla 1.3).

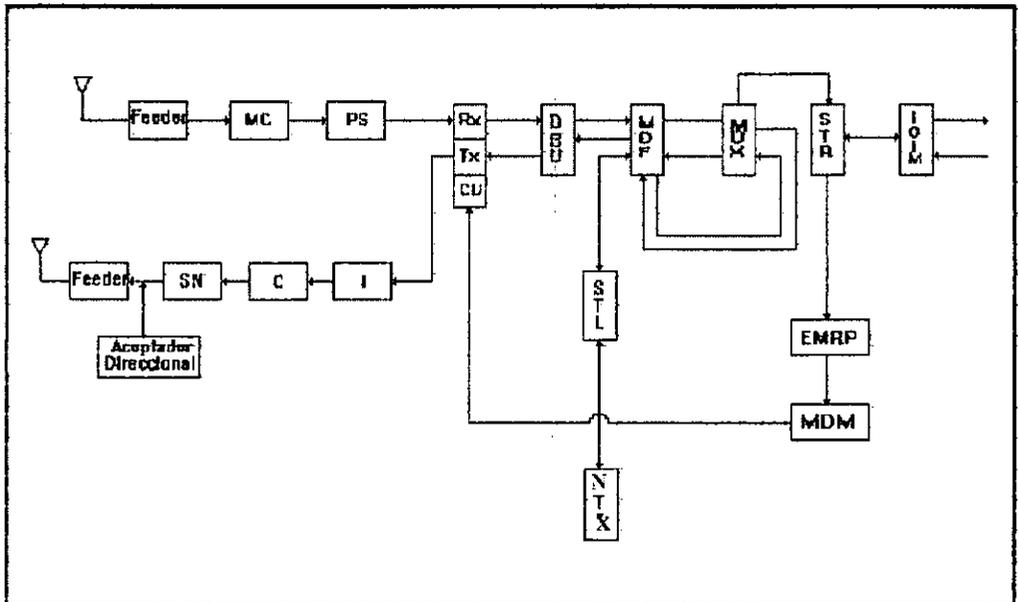


Figura 1.9 Configuración de interfase de la MTSO.

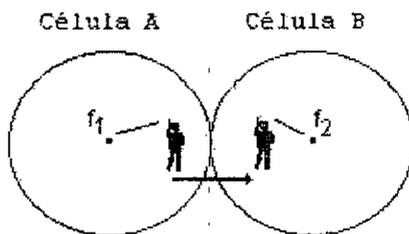
**Enlaces** - Los enlaces de radio y de datos de alta velocidad se realizan conectando los tres subsistemas mencionados anteriormente (Figuras 1.3 y 1.6). Cada unidad móvil puede usar únicamente un canal en un determinado instante para su enlace de comunicación; sin embargo, éste no es único, puesto que puede ser cualquiera de los canales que contiene la banda asignada para el área de servicio.

### 1.2.3 Operación de un sistema celular

La operación de un sistema celular puede ser dividida en las siguientes cuatro partes, más un proceso de cambio automático de frecuencia:

- **Inicialización de la unidad móvil** - Cuando se activa el receptor de la unidad móvil, éste revisa los 21 canales de instalación correspondientes a las 21 células más cercanas a él; posteriormente selecciona aquel canal del cual recibe mayor potencia y lo supervisa por un determinado tiempo.
- **Llamada originada por la red** - Cuando un abonado de la línea terrestre marca el número de la unidad móvil deseado, la oficina de la compañía telefónica de zona reconoce que el número pertenece a un servicio móvil, por lo que enruta la llamada hacia la MTSO, la cual envía un mensaje de localización a determinadas estaciones base seleccionadas de acuerdo al número de la unidad móvil y a un algoritmo de registro; éstas a su vez, transmiten el mensaje de localización por medio de su propio canal de instalación asignado, comenzando así el proceso de inicialización de la unidad móvil, mencionado anteriormente.
- **Llamada originada por el móvil** - Después de que el usuario marca el número deseado, éste es capturado por un registro de la unidad móvil, desplegándolo en su pantalla para que pueda ser revisado por el usuario y en caso de ser correcto, oprimir el botón de envío (send). Posteriormente, la central celular correspondiente al canal seleccionado, recibe el número enviado y elige el sector de la antena con mayor directividad hacia el móvil, al mismo tiempo que a través de un enlace de datos de alta velocidad, solicita a la oficina de conmutación telefónica móvil ( MTSO ) un canal de voz apropiado para conectar la llamada.

- **Terminación de una llamada** - Cuando se apaga el transmisor de la unidad móvil, se transmite un tono de señalización particular hacia la central celular y ambas partes liberan el canal de voz.
- **Proceso de handoff** - Durante la llamada, los usuarios que intervienen en la comunicación comparten un canal de voz, pero conforme alguno de ellos se desplaza fuera del área de cobertura de la central celular actual, la unidad móvil correspondiente presenta dificultad en la recepción de la señal, que es cada vez más débil; por ello, la misma estación base solicita a la MTSO un proceso de cambio automático de frecuencia, conocido como handoff, el cual conmuta la llamada a un nuevo canal de frecuencia en una nueva célula, sin interrumpir la llamada ni alertar al usuario (Figura 1.10).



Potencia de la señal recibida por el móvil

$Pr \geq 40$  dB : se solicita SSD (Signal Strength for Decrease) de 3 en 3 dB.

$40$  dB  $> Pr > 30$  dB : óptima intensidad de la señal.

$Pr \leq 30$  dB : se solicita SSI (Signal Strength for Increase) de 3 en 3 dB.

$Pr \leq 20$  dB : se solicita el proceso de handoff, SSH (Signal Strength Handoff).

$Pr = 10$  dB : se establece el enlace con la nueva célula y se rompe la comunicación con la célula anterior SSB, (Signal Strength Break).

$f_1 \neq f_2$  para evitar interferencia en los límites entre células.

**Figura 1.10** Respuesta a los niveles de potencia recibidos en la unidad móvil.

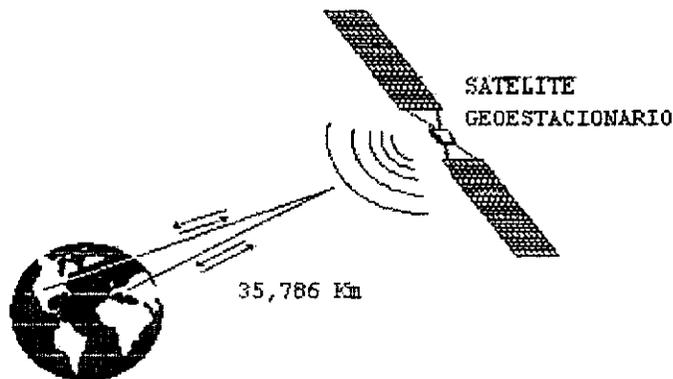
### 1.3 SISTEMAS SATELITALES DE COMUNICACIONES MÓVILES

#### 1.3.1 Órbitas para comunicaciones móviles

El área de cobertura de un sistema satelital de comunicaciones móviles está determinada por la ubicación de sus satélites y por el movimiento de los mismos respecto a la Tierra, de ahí la importancia de seleccionar la órbita apropiada.

Debido al tipo de servicios de comunicación requeridos y a la falta de tecnología satelital que permitiera el apropiado uso del espectro de frecuencias, hasta hace algunos años los sistemas satelitales geoestacionarios habían sido el único medio de comunicación espacial.

Sin embargo, al incrementarse los servicios de transmisión de datos debido al auge de la era digital y, principalmente al inicio de la tendencia hacia las comunicaciones móviles, estos satélites presentan inconvenientes de gran importancia (Figura 1.11), como son: el retardo mínimo de transmisión de aproximadamente medio segundo, el cual dificulta la compatibilidad con los sistemas terrestres digitales de alta velocidad; la cantidad de potencia de transmisión requerida para el enlace, que es mayor y encarece tanto el sistema como el servicio y, sobre todo, el enorme tamaño de las antenas, que son imprácticas en el diseño de terminales portátiles.



**Figura 1.11** Los inconvenientes de los satélites geoestacionarios radican en la enorme distancia a la que se encuentran, lo cual ocasiona inherentemente un retardo bastante significativo en las transmisiones terrestres de alta velocidad, así como el uso de alta potencia y el empleo de grandes antenas receptoras y transmisoras.

Todo ello, sugería desde hace tiempo el uso de órbitas de baja altitud que permitieran, además de una mejor administración del espectro de frecuencias, el empleo de satélites y equipo terrestre más pequeños y menos costosos.

Desafortunadamente, la cercanía de estas órbitas, implicaba dar una nueva solución a aspectos relacionados con la cobertura continua, la cual adquiere una mayor complejidad debido a la reducción de la huella y al desplazamiento del satélite, ya que deja de ser "geoestacionario"; así como del óptimo control de la trayectoria misma, debido a que ésta es más afectada por las fuerzas de atracción de la Tierra y por los cinturones de radiación de Van Allen, limitando de esta manera, aún más el tiempo de vida del sistema.

Fue después del desarrollo de potentes sistemas de microprocesamiento que se logró hacer factible la implementación del procesamiento a bordo y de enlaces intersatelitales, en satélites de menor masa. Gracias a estos avances, los actuales sistemas de comunicación móvil por satélite pueden actuar en cualquier órbita conveniente, ya sea geoestacionaria, media o baja, según el tamaño de la huella y de la terminal terrestre, así como el retardo y la potencia de transmisión que satisfagan el servicio móvil deseado ( veáse la figura 1.1).

### 1.3.2 Principales sistemas satelitales de comunicaciones móviles

Como resultado de los avances tecnológicos mencionados anteriormente, en los últimos años se han propuesto una cantidad de sistemas satelitales de comunicaciones móviles en las diferentes órbitas, e inclusive algunos de estos son ya una realidad. Entre ellos destacan los mencionados en las tablas 1.4 y 1.5, razón por la cual serán materia esencial de estudio en capítulos posteriores.

**Tabla 1.4** Algunos sistemas satelitales geostacionarios de comunicaciones móviles.

Sistema Satelital	INMARSAT	MSAT	SOLIDARIDAD
# de satélites (1996)	4	2	2
Servicios	Voz, Datos, Fax	Voz, Datos, Fax	Voz, Datos, Fax
Frecuencias (MHz)	1636.5 - 1645	1631.5 - 1660.5	1626.5 - 1660.5
Banda L <sup>1</sup>	1535 - 1543.5	1530 - 1559	1525 - 1559
Masa (Kg)		2500	2773.23
Cobertura	Global	U.S.A., Canada, México, Caribe	México, Sur de U.S.A., Norte de Centroamérica
Inicio de operaciones	1982	1994	1994

<sup>1</sup> Considerando el ancho de banda requerido por los servicios móviles, los organismos que administran el espectro de frecuencias, han convenido en asignar frecuencias de la banda L para el enlace móvil - satélite o viceversa, y frecuencias de las bandas C, Ku o Ka según el sistema, para la comunicación satélite - puerto y viceversa. Esta asignación evita que la comunicación con el puerto contribuya al tráfico de la banda L; y además, permite simplificar apreciablemente el diseño del satélite, cuando se coloca en los puertos antenas de gran ganancia que facilitan a los transpondedores correspondientes la reducción del punto de operación de sus amplificadores para limitar la posibilidad de intermodulación pasiva.

Tabla 1.5 Principales sistemas satelitales no geostacionarios de comunicaciones móviles.

----- órbita intermedia ----- | ----- órbita baja -----

Sistema	ICO	Odyssey	Idio	Globalstar	Orbcomm
Sede	Londres	California	Washington D.C.	California	Virginia
Principales Inversionistas	Inmarsat Hughes	TRW Teleglobe	Motorola, Sprint STET	Loral, SS/L Qualcomm	Orbital Teleglobe
# de satélites activos	10	12	66	48	28
# de planos orbitales	2	3	6	8	6
Inclinación (grados)	45	50	86.4	52	4 a 45 y 2 a 72
Altitud (Km)	10,355	10,354	783	1,414	775 y 740
Servicios	Voz, Datos, Fax, mens.	Voz, Datos Fax, Internet	Voz, Datos, Fax RDSS*, Paging	Voz, Datos, Fax RDSS, Paging	Mensajes no voz de 2 vías, Localización
Frecuencias de enlace (GHz)	1.980-2.010 ↑ 2.170-2.200 ↓ 5150- 5250 ↑ 6975- 7075 ↓	1.61-1.6265 ↑ 2.4835-2.50 ↓ 29.1-29.4 ↑ 19.3-19.6 ↓	1.6215-1.6265 ↓ ↑ 29.1-29.3 ↑ 19.4-19.6 ↓ 23.18-23.38 ↔	1.610-1.62135 ↑ 2.4835-2.5 ↓ 5.091-5.25 ↑ 6.875 - 7.055 ↓	0.148-0.1499 ↑ 0.137-0.1380 ↓ .400075-.400125 ↓
Masa por satélite (Kg)	2600	5155	689	450	43
Vida del satélite (años)	12	15	5-8	7.5	4
Cobertura	Global	Global	Global	Global	Global
Implantación total/ año	2000	2001	1998	1999	1998
Costo del sistema (millones de USD)	\$ 1,500	\$ 3,200	\$ 3,300	\$ 2,500	\$ 258
Tarifa (USD)	\$ 2 / min	~ \$ 1 / min	\$ 4.5 / min	\$ 0.35-0.53	\$
Terminal portátil (USD)	~ \$ 1000	\$ 500-700	\$ 500-700	\$ 750	~ \$ 550

\* Consultese el glosario

## 1.4 SISTEMA MÓVIL SATELITAL VS SISTEMA CELULAR TERRESTRE

### 1.4.1 Diferencias de cobertura

Al comparar los sistemas celulares terrestres con los sistemas satelitales de comunicaciones móviles, notamos que además de los servicios de transmisión de voz, estos últimos proveen también servicios de transmisión de datos (inclusive aquellos de alta velocidad que permiten la transferencia de sonido de alta calidad y de video comprimido) e incluyen dispositivos de localización de posición y sistemas de aviso; sin embargo, es la cobertura el aspecto fundamental que los diferencia.

Aunque obviamente dicha cobertura depende del ruido generado en los subsistemas empleados y de la atenuación de la señal transmitida debido a la distancia, a obstrucciones del medio y a la presencia de señales espurias, la principal causa de la diferencia de cobertura radica en la ubicación y potencia de las antenas transmisoras.

Aun no considerando el perfil del terreno, la cobertura de los sistemas celulares terrestres está limitada por la altura práctica de las torres que contienen las antenas transmisoras (alturas de hasta aproximadamente 70 m), mientras que en los sistemas satelitales las antenas sujetas a dichos aparatos orbitan cuando menos a 700 km. de altura sobre el nivel del mar; por esta razón, la cobertura de un sistema satelital es mucho mayor que la del mejor de los sistemas celulares terrestres; permitiendo que la operación de su servicio, aun en zonas de población de baja densidad, continúe siendo costeable.

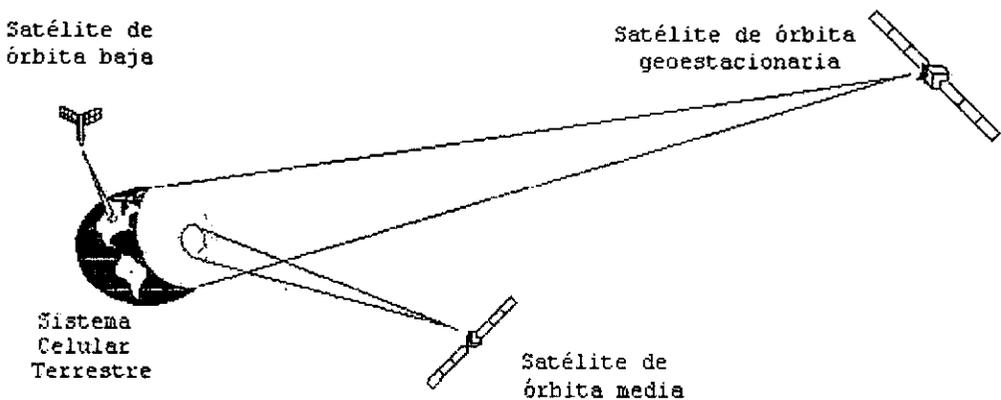


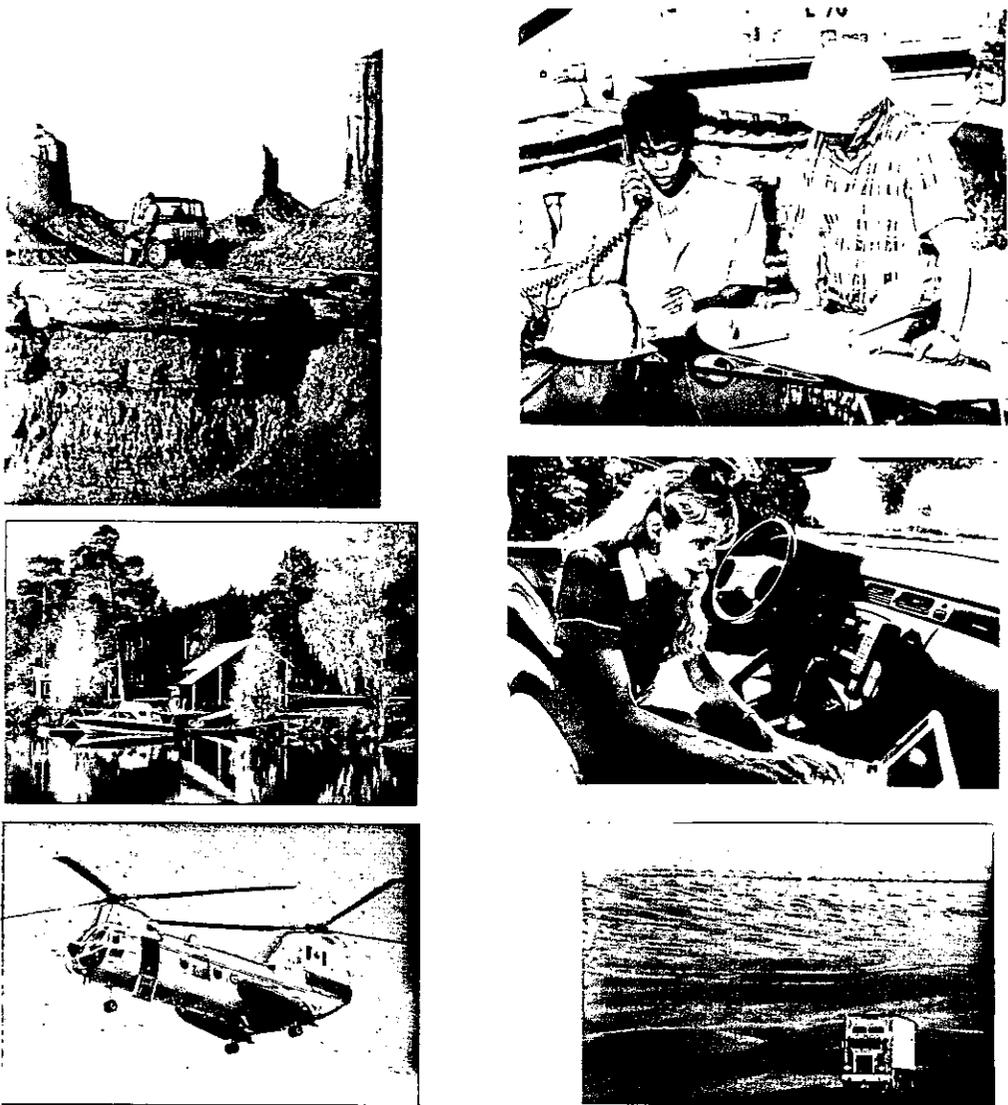
Figura 1.12 Cobertura de los principales sistemas básicos de comunicación móvil

En contraparte, la cobertura de los sistemas celulares terrestres es quien limita su óptimo funcionamiento hacia pequeñas zonas geográficas con elevados índices de transmisión. Considerando este hecho y a pesar de su enorme aplicación, se espera disponer para el año 2000 de la cobertura mostrada a continuación, la cual servirá a casi un 60% de la población mundial; sin embargo, ésta cubrirá sólo aproximadamente el 18% del globo terrestre.



**Figura 1. 13** Posible cobertura celular para el año 2000. El área iluminada representa a los territorios con cobertura celular mayor al 40%. (Cortesía de INMARSAT.)

Otra ventaja que se deriva de la posición de los satélites, es la independencia ante desastres en la superficie, lo cual implica su importante presencia cuando los sistemas de comunicación terrestres son dañados, o bien cuando su infraestructura es saturada. Además, su amplia cobertura constituye un enlace vital en investigaciones y operaciones de rescate tanto al combinarse con la extensa gama de servicios terrestres como al operar independientemente sobre extensas áreas remotas como se aprecia en la figura 1.14.



**Figura 1.14** Los servicios de comunicaciones por satélite son ampliamente aprovechados en todo el mundo, tanto en actividades de levantamiento de planos y uso de suelo, como por compañías transportista, agentes de ventas, personal de construcción, de mantenimiento y de seguridad pública, entre otros. (Cortesía de TMI Communications Inc. y Loral Corporation.)

### 1.4.2 El principio celular de los sistemas móviles satelitales

El actual reto de implantar un sistema global de comunicaciones móviles limita el uso de los sistemas celulares terrestres, que resultan ser bastante inadecuados al necesitar de una cantidad estratosférica de células de pequeña cobertura, que encarecería aún más el servicio en zonas con poca densidad. En cambio, dicho reto favorece el empleo de sistemas satelitales debido a que estos requieren de un menor número de subsistemas.

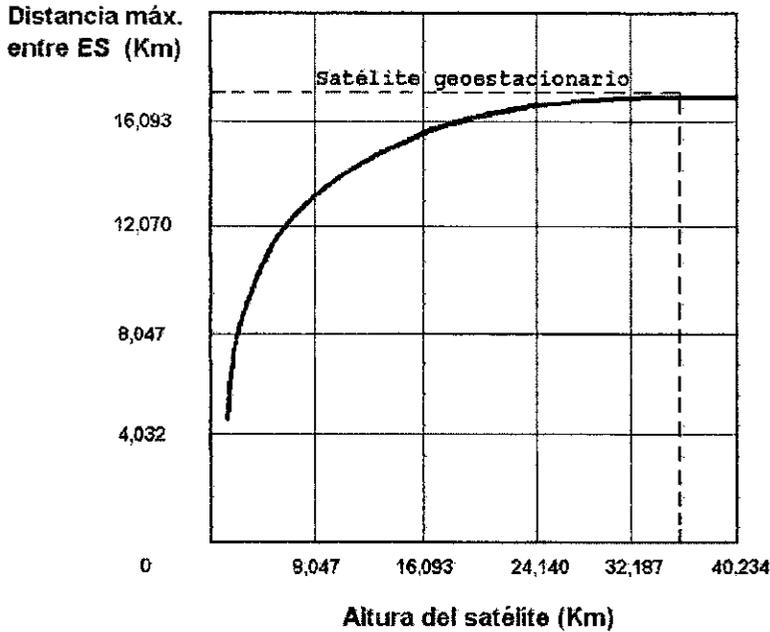
Ahora bien, como es difícil que un satélite pueda transmitir con ilimitada cantidad de potencia y además es de gran importancia que las unidades móviles sean ligeras y pequeñas, se requiere que los convencionales satélites geoestacionarios transmitan sus señales con fuertes códigos de redundancia, lo cual implica una disminución en la capacidad total del sistema; o bien, se necesita el uso de satélites en órbitas de menor altura que permitan a la pequeña antena de la unidad móvil el manejo de una potencia menor adecuada para la transmisión y recepción de las señales.

Como pudo apreciarse en la figura 1.12, la altura de la órbita es proporcional a la cobertura del satélite<sup>1</sup>. Por lo tanto, si se opta por el uso de satélites de mediana y baja altura, aumenta también el número de satélites necesarios para brindar una cobertura global (Figura 1.15), lo cual conlleva al desarrollo tanto de enlaces intersatelitales para evitar la necesidad de subir y bajar constantemente la señal hacia los puertos cercanos, que naturalmente implicaría un aumento en el tiempo de transmisión, como de tecnologías de control de trayectoria y de rastreo debido a que los satélites viajan a diferente velocidad y dirección que la rotación de la Tierra (Tabla 1.6), haciéndolos visibles desde un punto terrestre sólo temporalmente.

<sup>1</sup> Estrictamente, también depende del patrón de radiación de cada antena.

**Tabla 1.6** Parámetros típicos de las principales constelaciones satelitales

Constelación	GEO	MEO	LEO
Altura de la órbita (km)	35,786	~8,000-20,000	~ 200 - 3000
Período de Rotación (hrs)	24	5-10	1.5-2
Tiempo en línea de vista (hrs)	toda su vida	2-4	1/4 ≥ t
# de satelites (cobertura global)	~ 3-6	~ 6-20	40-840
Retardo de transmisión x salto	360-390 ms	190-220 ms	130-150 ms
Antena típica de las terminales	ref.parabólico ~ 1m, arreglos planos y de μcinta en fase ≥ 25 x 25 x 6 cm	látigo	látigo



**Figura 1.15** Aunque actualmente los satélites son capaces de radiar sobre un contorno menor predeterminado para aumentar la eficiencia de la cobertura, la máxima separación posible entre las estaciones terrenas define grosso modo, el diámetro máximo de la huella del satélite.

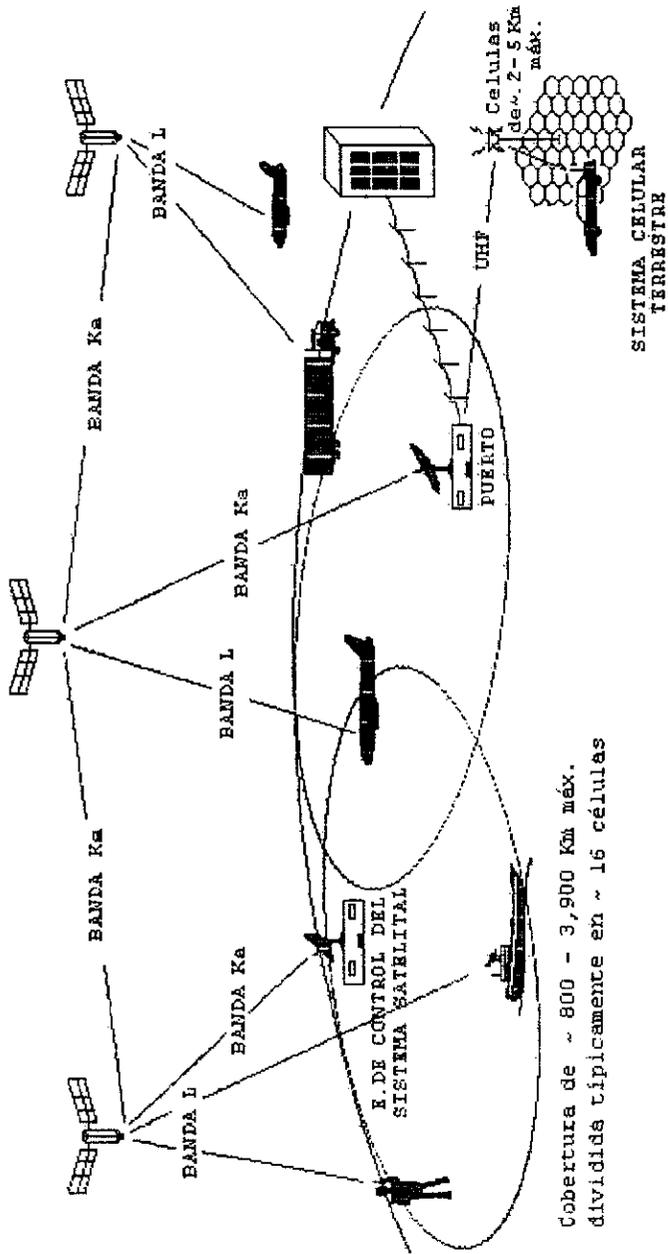
En base a dicha disminución en la huella de un satélite en órbitas de altitud inferior a la geostacionaria (véase la figura 1.12), la cobertura global de una constelación espacial requiere de un mayor número de satélites, como se aprecia en la siguiente figura:



**Figura 1.16** Patrón celular de cobertura de una constelación satelital de órbita baja. Las células de cada satélite (típicamente 16) variarán en tamaño y nivel de potencia conforme se distribuyan en la huella.

Comparando el patrón de cobertura de la figura 1.16 con el de un sistema celular terrestre (Figura 1.2), resalta la analogía entre los sistemas espacial y terrestre, ya que cada satélite actúa como una estación base en el espacio capaz de comunicarse con las estaciones base adyacentes (también en el espacio) y además brindar una cobertura celular móvil de mayor tamaño que la de cualquier célula terrestre.

Finalmente, como se ilustra en la figura 1.17, además de la posición de los transmisores, y obviamente del tamaño de las células, los sistemas espacial y terrestre, se diferencian en que mientras un sistema celular terrestre se constituye de células fijas, los sistemas satelitales generan células móviles que se desplazan conforme orbitan los satélites que integran la constelación.



Cobertura de ~ 800 - 3,900 Km máx.  
 dividida típicamente en ~ 16 células

Figura 1.17 Sistema global de comunicaciones móviles via satélites de órbita baja.

## 2

## ANÁLISIS HISTÓRICO DE LOS PRIMEROS SISTEMAS SATELITALES DE COMUNICACIONES MÓVILES

### 2.1 DESVENTAJA DE LOS SISTEMAS MÓVILES EN HF

El uso y desarrollo de los sistemas satelitales para comunicaciones móviles fue generado e inicialmente impulsado, por la imperiosa necesidad de implementar un sistema confiable de comunicación marítima que superara la funcionalidad de los enlaces en la banda de alta frecuencia (HF\*), los cuales basan su propagación en los efectos de refracción y reflexión de la onda transmitida al incidir en las múltiples capas que conforman a la ionósfera.

En estas altas capas de la atmósfera, comprendidas entre los 60 y 600 Km de altura; la presión del aire es muy baja (del orden de  $10^{-3}$  a  $10^{-9}$  bars <sup>1</sup>), lo cual permite que las radiaciones corpusculares y electromagnéticas del Sol al igual que los rayos cósmicos, puedan colisionar con el medio y ionizarlo. Sin embargo, como la composición del aire difiere de una altura a otra, las radiaciones, principalmente aquellas provenientes del Sol, proporcionan distinta densidad de ionización a cada capa. Estas a su vez, actúan como medios con diferentes velocidades de propagación (corrientes de ionización) entre sí y provocan la refracción y reflexión de las ondas radioeléctricas como se muestra en la figura 2.1.

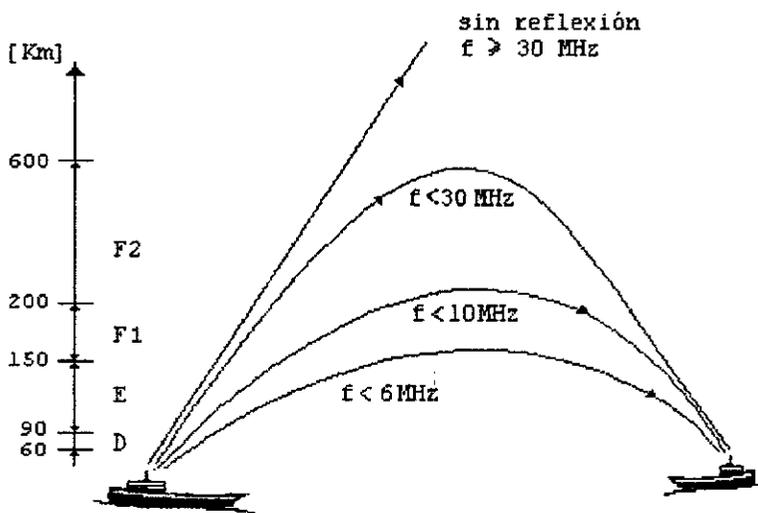
---

<sup>1</sup> Unidad de presión igual 1,019 Kg/cm<sup>2</sup>.

\* Consúltese el Glosario

La capa D compuesta casi en su totalidad por moléculas de ozono y ubicada entre los 60 y 90 Km de altitud, puede ser ionizada únicamente por los penetrantes rayos X. Por la noche, su densidad de electrones libres es prácticamente nula, mientras que en pleno día alcanza una densidad de aproximadamente 10,000 e/cm cúbico, la cual le resta un poco de energía a las ondas hertzianas, aunque sin absorberlas ni reflejarlas. A una mayor altura, entre los 85 y 150 Km, la capa E, conformada principalmente por moléculas de oxígeno es ionizada por los rayos ultravioleta y por los rayos X poco energéticos, quienes le confieren una densidad eléctrica cercana a los 100,000 e/cm cúbico, capaz de reflejar las ondas radioeléctricas de longitud de onda mayores a 50 m; esto es, menores a 6 MHz.

Finalmente, constituida en su mayoría por moléculas de nitrógeno, la capa F tiene la propiedad de desdoblarse durante el día en una región F1 comprendida entre los 150 y 200 Km, capaz de reflejar las ondas radioeléctricas próximas a los 10 MHz; y en otra región F2 de hasta 400 Km de altitud, que presenta una ionización tan intensa que genera una densidad de casi 1,000,000 e/cm cúbico, la cual subsiste aún por la noche y permite la reflexión de las ondas radioeléctricas de frecuencias menores a los 30 MHz.



**Figura 2.1** Esquema simplificado de la reflexión de ondas electromagnéticas en las distintas capas de la ionósfera.

Como la densidad eléctrica de estas subcapas mantiene estrecha relación con la actividad diurna del Sol y la variación del ciclo solar de 11 años, la ionósfera se comporta como un medio sumamente inestable para cualquier enlace de comunicación en la banda de HF. Por tal razón, el sector marítimo tuvo que emprender la implementación de un sistema más confiable, pero que conservara la amplia y necesaria cobertura del servicio.

Estas características, señalaban como mejor opción el uso de satélites, debido a que emplean ondas radioeléctricas con frecuencias mayores a las de la banda de HF, capaces de atravesar la atmósfera sin ninguna alteración; y además, su ubicación en el espacio les permite radiar sobre extensas áreas geográficas

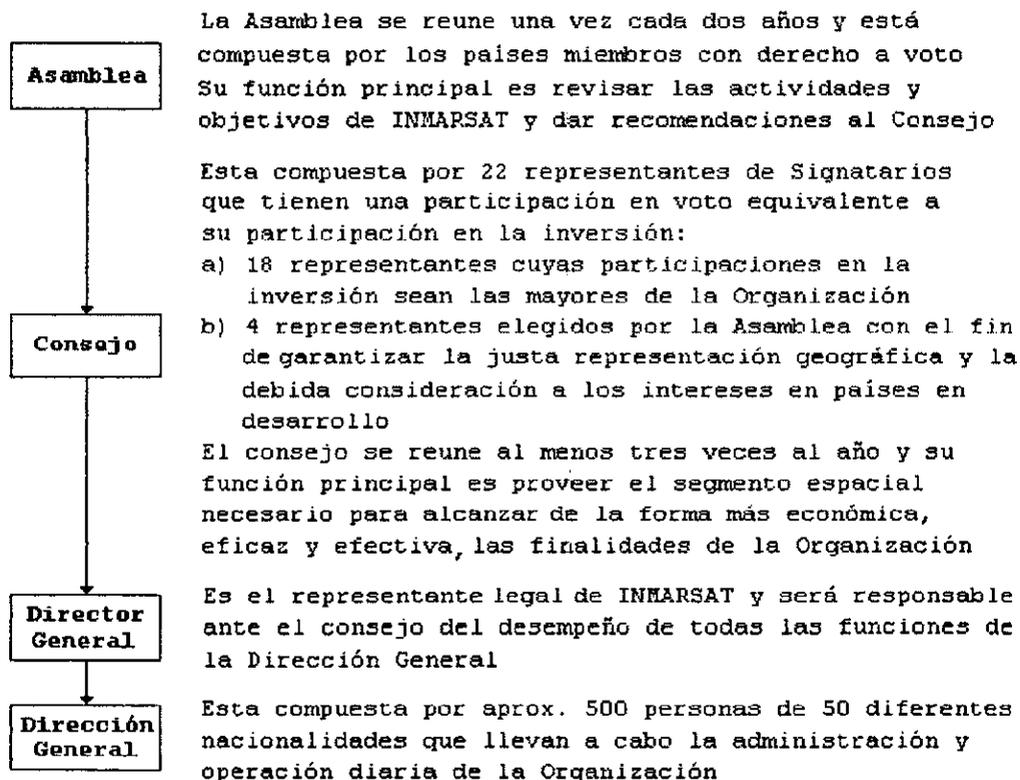
## **2.2 INMARSAT, EL PRIMER SISTEMA SATELITAL DE COMUNICACIÓN MÓVIL**

Aunque los primeros ensayos de servicio móvil satelital fueron sólo con propósitos militares, desde 1963 con SYCOM II y continuado con la serie ATS, el primer hecho que resaltó el gran interés de emplear a los satélites para disponer de un sistema mundial de comunicación marítima de uso comercial, tuvo lugar en 1973 durante la Conferencia Internacional convocada por la IMCO (Organización Marítima Consultativa Intergubernamental), en la cual se favoreció notoriamente la creación de una organización encargada de implantar y administrar dicho sistema; dando lugar a los primeros acuerdos entre quienes deseaban formar parte de esta organización.

Posteriormente, a partir de 1976, el número de países interesados en tal proyecto, aumentó notablemente después de que la Corporación de Satélites de Comunicación (COMSAT) lanzara el sistema MARISAT; éste estaba formado por 3 satélites geoestacionarios, limitados para el océano Atlántico pero con operabilidad en la banda L para uso móvil militar y comercial. Dicho incremento culminó en 1979 con el establecimiento de INMARSAT, International Maritime Satellite Organization, la primera organización mundial encargada de proveer comunicación móvil satelital a barcos, la cual comenzó a operar su servicio hasta 1982, cuando asumió la responsabilidad del sistema MARISAT adquirido por la organización ya en 1981; marcándose así, el inicio del uso comercial de los sistemas satelitales de comunicación móvil a nivel mundial.

Desde entonces y con sede en Londres, Inglaterra, el consorcio INMARSAT a controlado su operación mediante la siguiente estructura organizacional:

**Tabla 2.1 Estructura Organizacional del consorcio INMARSAT.**



De igual forma, el sistema INMARSAT continúa esencialmente integrado por un segmento espacial, compuesto por un conjunto de satélites en constante evolución; y por un segmento terrestre, formado por tres estaciones de control de red (NCS - *Network Control Station*)<sup>1</sup>, varias estaciones terrenas costeras (CES - *Coast Earth Station*)<sup>2</sup> y diversas terminales móviles.

Debido a que la historia de las comunicaciones móviles satelitales radica en la evolución misma del sistema INMARSAT, en el presente capítulo se resaltarán su desarrollo sin profundizar en detalle, dejando pendiente el estudio tecnológico para el capítulo correspondiente al análisis de los sistemas geoestacionarios.

---

<sup>1</sup> Cada NCS es instalada para controlar una región oceánica. Mientras que el Océano Atlántico es controlado por la estación terrena ubicada en Southbury en los Estados Unidos de América, el Océano Pacífico y el Océano Índico son coordinados respectivamente a través de las estaciones terrenas de Ibaraki y Namaguchi, ambas ubicadas en Japón. Estas tres estaciones emiten en su respectiva región oceánica, la información pertinente a la red, sobre un canal TDM\* con frecuencia portadora única. Por ello, dicho canal es continuamente monitoreado tanto por las estaciones terrenas costeras como por las terminales móviles que en ella se encuentren.

<sup>2</sup> Las estaciones terrenas costeras realmente no son propiedad de INMARSAT, ni son operadas por éste sino por las PTT\* correspondientes; sin embargo, actúan en el sistema como puertos de interconexión entre las redes terrestres adyacentes y las terminales móviles de la región. Además de ser un medio de transmisión de servicios de telefonía, telex, datos, etcétera; estas son un centro de control y de acceso, puesto que monitorea el estado de cada canal y enrutan, conectan y registran las llamadas, proporcionando también información para facturar y realizar el cargo respectivo. Actualmente, éstas son también conocidas como *LES (Land Earth Station)* en el caso de comunicaciones terrestres y como *AES (Aeronautical Earth Station)* en comunicaciones aéreas. Su estructura interna puede variar relativamente, pero su funcionamiento dentro del sistema INMARSAT es el mismo.

\* Consúltense el Glosario

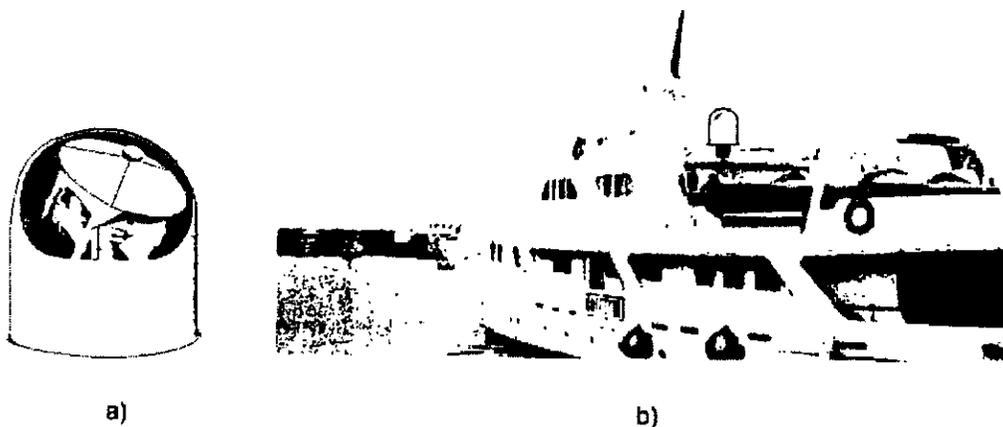
### 2.2.1 Evolución de las terminales móviles de INMARSAT

Aun cuando las primeras terminales móviles, heredadas directamente del sistema MARISAT, eran voluminosas, pesadas y muy caras, por la falta de sofisticada tecnología para la banda L, y pese a la restringida comunicación móvil por satélite en las costas, influenciada por el entonces uso obligatorio de enlaces en HF, INMARSAT demostró la enorme confiabilidad de sus enlaces, favoreciendo su uso en el sector marítimo, despertando gran interés en los fabricantes de equipo de comunicación, por crear mejores terminales móviles, más pequeñas, ligeras y económicas. Fue a partir de entonces, que en base a la tecnología disponible por dichos fabricantes de equipo terminal y a la demanda de los usuarios, INMARSAT ha establecido estándares en las terminales móviles para proporcionar su servicio de comunicación.

La primera terminal estándar, conocida como Inmarsat-A, emplea tecnología puramente analógica y fue diseñada exclusivamente para proveer servicios de comunicación marítima de alta calidad a grandes y renombradas embarcaciones, capaces de pagar altas tarifas por el servicio. Contando con una antena de reflector parabólico de 0.90 m, dicha terminal ofrecía inicialmente a \$ 6 USD por minuto, sus servicios de voz y datos a través de un canal bidireccional para telex y un sólo circuito full-duplex para voz, el cual, posteriormente con un costo de \$ 10 USD por minuto, fue también usado para transmisión simultánea de voz, datos y facsimil a una tasa máxima de 9.6 kbps.

No obstante que actualmente existen 17 fabricantes que han incluido dispositivos en esta primera versión de Inmarsat-A para hacerla más eficiente, dicha terminal no ha sufrido cambios radicales en su estructura, y básicamente continúa formada de una sección exterior y una sección interior. La sección exterior se compone de dos subsistemas; una unidad electrónica que controla al amplificador de alta potencia (HPA\*), al amplificador de bajo ruido (LNA\*) y a los respectivos convertidores de frecuencia intermedia; y de una antena estabilizada capaz de rastrear automáticamente al satélite bajo considerables condiciones de movimiento; la cual se encuentra protegida junto con su alimentador, de las condiciones climáticas mediante un domo de diámetro y altura aproximada de 1.4 m como se ilustra en la figura 2.2.

\* Consúltese el Glosario

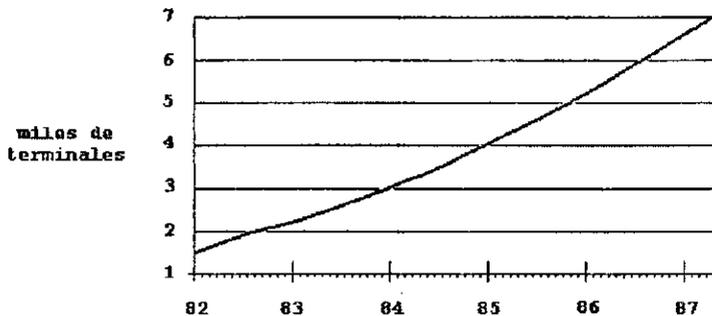


**Figura 2.2** a) Antena y sistema de seguimiento automático de una terminal estándar A de Inmarsat, en el interior de su cúpula protectora; b) instalación en la cubierta de un yate. (Cortesía de Anritsu.)

Dependiendo del fabricante y de manera complementaria, la sección interior puede ser la que realice la conversión a frecuencia intermedia de la señal recibida; ésta se encuentra bajo cubierta, integrada por la unidad electrónica principal que realiza el procesamiento de la información y el control de operación del enlace; así como por el equipo periférico que facilita al usuario el manejo de dicha terminal, básicamente compuesto por la unidad telefónica, la terminal de telex y las conexiones para facsímil y computadora.

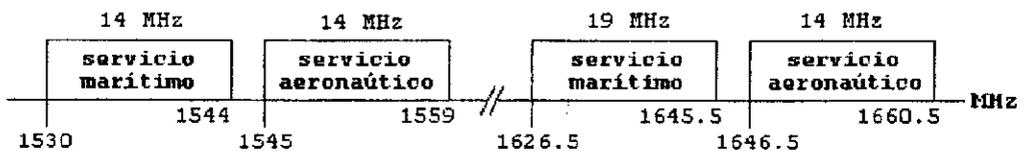
La alta calidad de los servicios analógicos que ofrece Inmarsat-A implican pesadas y costosas instalaciones, que se suman tanto al peso de la terminal (entre 36.3 y 136 Kg) como al valor de la misma (de \$30,000 a \$40,000 USD); resultando difícil su adquisición. Sin embargo, las notables ventajas de su servicio inicialmente en aplicaciones marítimas tanto en aspectos administrativos como de seguridad, permitió justificar las inconvenientes características del equipo; promoviendo su uso en el rubro de transportación; no sólo en el ámbito marítimo sino también en el sector terrestre, que al representar una fuerte demanda, posteriormente fue parcialmente atendido mediante terminales Inmarsat-A adaptadas en la estructura de los vehículos.

Ante esta reacción, el número de terminales móviles aumentó significativamente, como se muestra en la figura 2.3, lo cual motivó al consorcio INMARSAT a buscar nuevas aplicaciones de su servicio satelital a través de mejores terminales móviles. El siguiente logro del consorcio se dio en 1985, cuando finalmente obtuvo aprobación para incursionar en el sector aéreo gracias a la exitosa participación de su Asamblea en la tercera Conferencia Internacional sobre Sistemas Satelitales de Comunicaciones Móviles.



**Figura 2.3** Aumento en el número de terminales INMARSAT-A de 1982 a 1988. (Cortesía de INMARSAT.)

Posteriormente, en ese mismo año, INMARSAT convocó a los fabricantes de equipo terminal para iniciar simultáneamente el desarrollo de nuevas terminales móviles con tecnología de comunicación digital que fuesen capaces de aprovechar eficientemente la potencia de los satélites, así como la limitada banda de frecuencias asignada para las comunicaciones marítimas vía satélite (Figura 2.4).



**Figura 2.4** Asignación de frecuencias para proporcionar servicio de comunicación móvil vía satélite, establecidas en 1971.

Aun cuando inmediatamente se abordaron los estudios para el desarrollo de dichas terminales, ya entonces identificadas como Inmarsat-C, Inmarsat-B e Inmarsat-aero, gran parte del sector de transportación terrestre encontró anticipadamente en 1987, respuesta a sus necesidades de comunicación con el surgimiento de Omnitrac<sup>1</sup>, que es un sistema móvil satelital de datos de baja velocidad con operabilidad en la banda Ku, el cual permitió el uso de una terminal menos compleja, más pequeña y más barata que la única terminal de INMARSAT ofrecida hasta entonces (estándar A).

Sin embargo, lejos desacelerar su crecimiento, INMARSAT mantuvo dedicado interés en las terminales digitales, mientras que los fabricantes de Inmarsat-A presentaron en 1988 nuevas versiones multicanal con opción para transmisión de datos de alta velocidad a 64 kbps, las cuales permitían entre otras aplicaciones, la transferencia bidireccional simultánea de datos, la transmisión de imágenes y videos comprimidos así como de audio de alta calidad de sonido a 15 KHz y de videoconferencias; aumentando así su utilidad en buques petroleros, agencias internacionales de noticias y en muchos otros rubros donde se requería de estos servicios de mayor ancho de banda. De manera simultánea, también se ofrecieron sus versiones transportables de 20 a 50 Kg. de peso, contenidas en uno o dos estuches del tamaño de una maleta, complementadas con una antena de reflector parabólico plegable de aproximadamente un metro de diámetro.

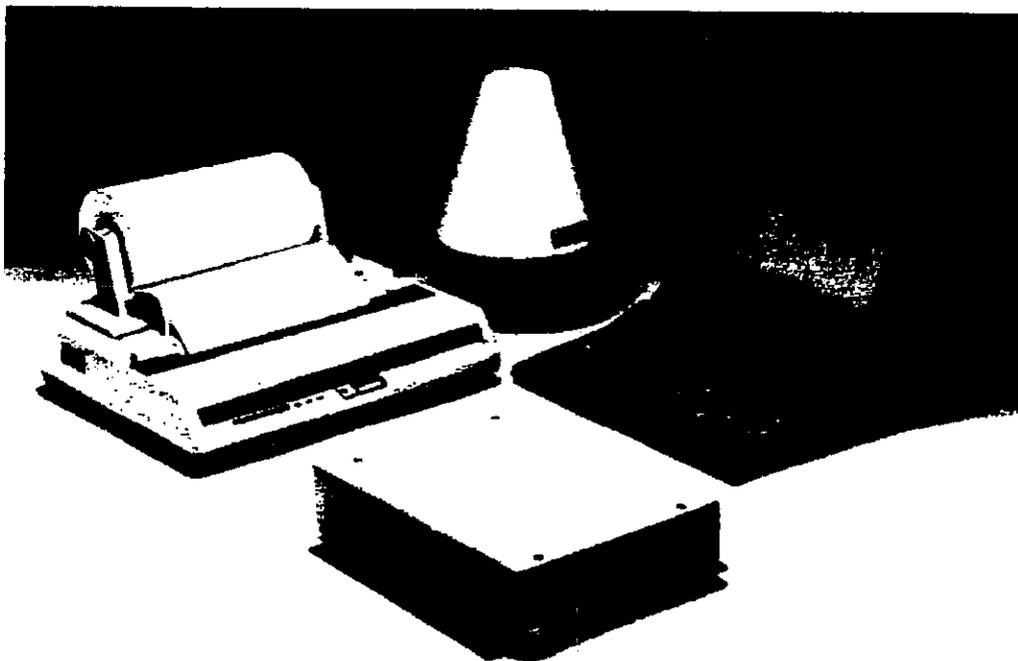
Posteriormente, en 1989, contando INMARSAT ya con el permiso para incursionar en el sector aéreo, ofreció por primera ocasión el servicio de telefonía y de datos para líneas aeronáuticas, a través de terminales modificadas de Inmarsat-A, adaptadas a la geometría del fuselaje de los aviones. En este mismo año, tras un año de pruebas, la primera terminal estándar digital "Inmarsat-C" inicio operación proporcionando comunicación bidireccional a 600 bps por medio de un protocolo de almacenamiento y retransmisión capaz de enviar y recibir datos con extensión de hasta 32 bytes y mensajes de un máximo 32 Kilobytes (e inclusive aquellos mensajes de destinatario múltiple) a un costo de \$ 1.2 USD por cada 1000 bits.

---

<sup>1</sup> Debido a que el sistema OmniTRACS no opera en banda L sino en banda Ku, sus características se mencionarán en otra sección del presente capítulo.

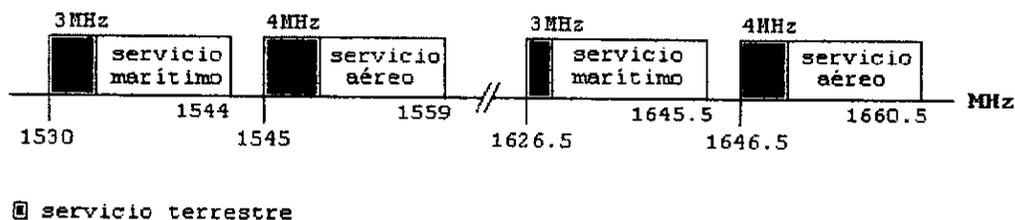
Aunque algunas de estas terminales vienen dotadas de un sistema de preparación de mensajes y de una pantalla, y otras cuentan con un puerto de acceso RS-232 normalizado para que el usuario conecte su propia computadora u otro dispositivo informático; ambas pueden conectarse o integrarse con una amplia gama de sistemas de navegación altamente confiable, ya que los datos de situación obtenidos de los sistemas terrestres Decca y Loran C, de los sistemas satelitales GPS, Glonass y Transit, o bien de mecanismos de alta precisión a bordo; pueden ser transmitidos a voluntad o a intervalos fijos.

Con un valor aproximado de \$ 4500 USD, Inmarsat-C es una terminal de bajo consumo de energía que emplea una pequeña antena omnidireccional para banda L que, por su reducido peso y tamaño permitió la fácil instalación en embarcaciones y vehículos terrestres así como la creación de estándares de las mismas para su uso en avionetas y aeronaves que no requerían equipo para voz.



**Figura 2.5** Terminal estándar Inmarsat-C. (Cortesía de INMARSAT.)

Pese a que se contaba con terminales estándar A y posteriormente C de Inmarsat, adaptadas e integradas en aviones, éstas obviamente no habían sido diseñadas para tal aplicación (mientras que Inmarsat-A era bastante caro y difícil de instalar, Inmarsat-C carecía de servicio de voz). Por consiguiente, las pruebas del sistema Inmarsat-aero iniciadas en 1987 a bordo de un avión de Japan Airlines, continuaron en aviones Varig y Sabena de Air France especialmente equipados, así como en Boing 747 de British Airways y en algunos jets de propulsión a chorro (Jetstream); hasta lograr la primera llamada telefónica comercial en febrero de 1989, durante un vuelo Londres-Nueva York de British Airways a través del satélite MARECS B2 de INMARSAT. Finalmente, Inmarsat-aero emprendió su servicio aeronáutico en 1990, ya sobre la asignación de frecuencias hecha en 1987, la cual entró en vigor en octubre de 1989.



**Figura 2.6** Asignación de frecuencias para servicio móvil satelital elaborada en 1987. Entró en vigor en octubre de 1989, debido a la enorme demanda de servicio en el ámbito terrestre.

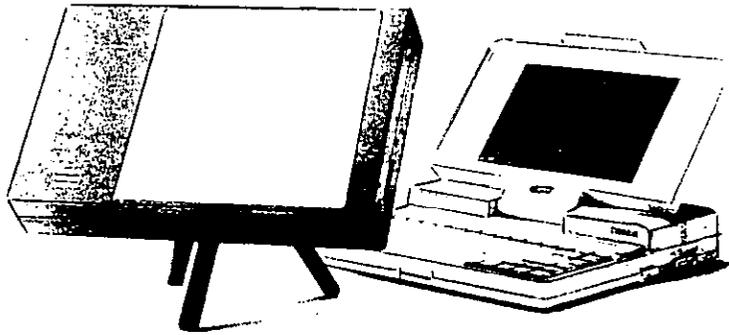
Con la intención de contrarrestar el efecto doppler provocado por el movimiento del avión (obviamente mucho mayor que el de una embarcación) Inmarsat-aero emplea modificaciones tanto en los convertidores de frecuencia como en la circuitería de corrección automática de frecuencia de las CES. Sus tres principales configuraciones de tecnología japonesa permiten la transmisión de datos a una velocidad de 300 bps, o transmisión sólo de voz, o bien de voz y datos, a una tasa máxima de 9600 bps, las cuales encuentran gran aplicación en servicios de tráfico aéreo, control operacional en aerolíneas y servicio de voz y datos para pasajeros.



**Figura 2.7** Terminal móvil del sistema Inmarsat-aero. (Y.Yasuda, Fourth International Conference on Satellite Systems for Mobile Communication and Navigation, IEE & Inmarsat, octubre 1989.)

Previamente, en 1989 se había creado en INMARSAT un pequeño pero especializado grupo de trabajo denominado Proyecto-21, al que se encomendó analizar la evolución de las comunicaciones móviles por satélite, realizar una serie de estudios exhaustivos sobre las futuras necesidades de los clientes y, principalmente dar a éstas soluciones viables mediante el uso de técnicas avanzadas de comunicaciones por satélite. Habiendo llegado a la conclusión de crear terminales telefónicas satelitales portátiles personales, la cual implicaba un cambio radical en el segmento espacial, imposible de implementar al instante; Proyecto-21 propuso iniciar en primera instancia el desarrollo de terminales realmente portátiles de uso personal.

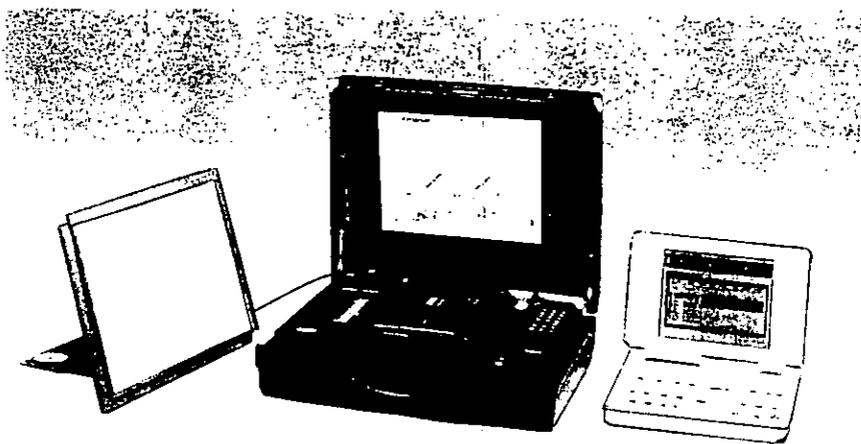
Como resultado de dicha iniciativa y tras el lanzamiento de una nueva generación de satélites (Inmarsat-2), surge en 1991 la versión portátil del estándar C de Inmarsat, para proporcionar el primer servicio de comunicación personal por satélite. Esta innovadora versión emplea una antena plana incorporada al maletín que la contiene (Figura 2.8), facilitando su transportación que resulta ser ampliamente aprovechada por agentes de negocios internacionales, quienes pueden enviar o recibir mensajes y archivos desde su computadora personal.



**Figura 2.8** Terminal portátil Inmarsat-C conectada a una computadora personal. (Cortesía de INMARSAT.)

Posteriormente, en diciembre de 1992, tuvo lugar un suceso de gran importancia para todos los sistemas satelitales que se discutirán en esta tesis. Bajo la dirección de Proyecto-21, fue comercializado Inmarsat-M, el primer teléfono móvil satelital de uso personal. Esta terminal de entre \$15,000 y \$20,000 USD sacrifica un bit en la calidad de voz y un bit en la tasa de transmisión de datos para reducir drásticamente su tarifa a \$5.50 USD por minuto y su peso a tan sólo 13.6 Kg.

Los servicios disponibles a través de Inmarsat-M son: transmisión de telefonía digital a 4.8 kbps y, envío de facsímil digital (grupo III) y datos a 2.4 kbps. Al igual que el estándar C, dicha terminal puede operar con distintas antenas según su uso: desde las versiones de reflector parabólico para buques, dirigidas mecánicamente y estabilizadas por giroscopio, hasta los sistemas de antenas planas y horizontales incorporados al maletín que la contiene (Figura 2.9). Inmarsat M, cuenta también con puertos de conexión para impresora y terminal de facsímil, además de una función de alerta, lo cual permite complementar el equipo SMSSM (Sistema Mundial de Socorro y Seguridad Marítima) del buque.



**Figura 2.9** Terminal telefónica de Inmarsat-M. Aunque puede conectarse a la línea eléctrica, es capaz de soportar hasta una hora de comunicación continua a través de su batería. (Cortesía de INMARSAT.)

Sin olvidar la imperiosa necesidad de mejorar los primeros servicios, en 1993 Inmarsat introdujo la operación de su último estándar digital "Inmarsat-B", el cual hasta la fecha continúa reemplazando gradualmente la voluminosa y pesada versión del estándar A, mediante sus servicios de telefonía, facsímil y télex de marcación directa; transmitidos a 64kbps y recientemente en 1996 a 9.6 kbps. Con el fin de reducir a un mínimo de \$30,000 USD el costo de la terminal móvil y aprovechar al máximo tanto los canales del satélite como el equipo de la estación terrena terrestre, Inmarsat-B fue concebido con un alto nivel de compatibilidad con el sistema compacto Inmarsat-M.

De esta manera todas las CES's de Inmarsat-B podrán operar en Inmarsat-M y viceversa, lo cual también permite reducir la tarifa del servicio a \$ 3 y 6 USD por minuto; ahora que para el caso de terminales multicanal que obviamente emplean menor potencia del satélite es posible contar con tarifas mínimas de hasta \$2 USD por minuto

Continuando con el análisis para desarrollar terminales telefónicas satelitales de uso manual, durante 1992-1993, Proyecto 21 convocó a varias compañías aeroespaciales para obtener estudios técnicos detallados de la infraestructura necesaria en cada uno de los posibles sistemas satelitales:

**GSO, Geoestacionary Satellite Orbit:**

Martin Marietta (USA) con Matra-Marconi ( Francia & UK).

Hughes Space & Communications (USA) con British Aerospace (UK) y NEC (Japón).

**ICO, Intermediate Circular Orbit:**

Matra-Marconi (Francia & UK) con GE Astro (USA).

TRW (USA).

**LEO, Low Earth Orbit:**

Alliance Consortium formado por Aerospatiale (Francia), Alcatel (Francia), Alenia (Italia) y Deutsche Aerospace (Alemania).

Antrix (India) con Indian Space Research Organization ( ISRO).

Posteriormente, tras una cuidadosa evaluación entre los estudios preliminares tecnológicos y económicos de los tres posibles sistemas satelitales en combinación con los resultados obtenidos de un estudio de mercado realizado en países geográfica y económicamente representativos del mundo (USA, Brasil, Core, India México, Turquía, Inglaterra e Indonesia); el Consejo de INMARSAT decidió en julio de 1993, descartar el sistema LEO debido a su elevado costo, su compleja implementación y por presentar dificultades de enlace en áreas con obstáculos.

Entre los dos sistemas restantes, se observó que a pesar que el sistema GEO era el más económico, éste requería que el usuario estuviera estacionado durante la comunicación; por tal razón, en febrero de 1994, ICO<sup>1</sup> fue elegido como el mejor sistema, debido a que mostró una preferencia en el estudio de mercado y técnicamente era factible. Desafortunadamente, para llevar a cabo dicho sistema, ICO tuvo que ser constituido como una empresa comercial de inversionistas de más de 40 países, donde resaltan las acciones de INMARSAT.

---

<sup>1</sup> ICO será estudiado en detalle posteriormente en el capítulo correspondiente al análisis de sistemas satelitales no geoestacionarios.

Sin embargo, avante en su desarrollo, INMARSAT prepara Inmarsat-D, el primer sistema mundial de radiobúsqueda, a través del cual, los usuarios podrán, además de recibir todas las ventajas de los radiolocalizadores terrestres en cuatro niveles de prioridad (prioritario, urgente, normal y no crítico), especificar el número de retransmisiones deseadas y definir coordenadas (hora y lugar de recepción), e inclusive disponer opcionalmente de una impresora integrada. Así como de los siguientes servicios de valor agregado:

- Actualización de información financiera y bursátil.
- Información meteorológica.
- Boletines informativos.

Inicialmente se dispondrá de tres tipos de receptor. El receptor de bolsillo cuenta con indicador de orientación y dispositivo de ahorro de energía; el receptor adaptado en vehículos y terminales semifijas (Figura 2.10), emplea una antena exterior con base magnética, es compacto, ligero y está equipado con indicador de intensidad de señal y pantalla iluminada; y finalmente, el receptor integrado en unidades portátiles Inmarsat C o M, que funciona aun cuando éstas se encuentren apagadas.



**Figura 2.10** Receptor de Inmarsat-D diseñado para adaptarse a vehículos y terminales semifijas. Dimensión aproximada: 15 x 20 cm. (Cortesía de INMARSAT.)

Con capacidad para almacenar y visualizar mensajes de hasta 128 caracteres de extensión, Inmarsat-D será sin duda un sistema práctico para organizaciones que utilizan los medios de difusión (p.ej. información cambiaria y bursátil, boletines de noticias, y avisos sobre tarjetas de crédito robadas), organizaciones comerciales (compañías de transportes y servicios públicos) órganos oficiales y empresarios que viajen a países en desarrollo.

### 2.2.2 Aceptación de INMARSAT

El hecho de que INMARSAT iniciara su operación en 1982 usando el sistema MARISAT (el cual incluía casi 1,000 terminales móviles), le facilitó enormemente la transición e integración de nuevos y mejores satélites. En su primer año, INMARSAT adquirió el satélite MARECS-A de la Agencia Espacial Europea (ESA) para también ofrecer cobertura a la región oceánica del atlántico. Posteriormente, la organización tuvo que arrendar tres subsistemas de comunicación marítima (MCS) a bordo de satélites INTELSAT V, principalmente para proveer cobertura a la región oceánica de la India y proporcionar respaldo a esta misma región, así como a la región oceánica del atlántico; para más tarde en 1986, reemplazar completamente a los originales satélites MARISAT (Tabla 2.2).

Hacia finales de marzo de 1988, contando con 54 países miembros; la capacidad brindada por dicha red satelital permitió a Inmarsat proveer servicio satisfactorio a las ya 6705 terminales móviles, de las cuales 6200 estaban instaladas en embarcaciones y el resto habían sido adaptadas en vehículos terrestres.

La siguiente generación de satélites, INMARSAT-2, estuvo a cargo de British Aerospace y fueron puestos en órbita durante 1989 y 1990. Este conjunto de 4 satélites de estabilización triaxial hizo posible el uso de terminales digitales y por supuesto contribuyó al crecimiento del consorcio INMARSAT; el cual logró en el tercer cuarto de 1993, un total de 70 signatarios.

Posteriormente, durante 1995 y 1996, se integró al segmento espacial INMARSAT-3, la tercera y hasta la fecha última generación de satélites INMARSAT, compuesta por 5 potentes satélites que disponen de equipo extra para proveer compatibilidad con sistemas GPS (ahorrando casi un 95% del costo en crear y colocar en órbita un satélite GPS propio) abriendo así, una enorme posibilidad en el desarrollo de las terminales de comunicación personal que de antemano tienen la oportunidad de disminuir el costo de sus tarifas por servicio.

**Tabla 2.2** Satélites geoestacionarios MARISAT, MARECS e INTELSAT V empleados por el sistema INMARSAT.

Satélites	MARISAT	MARECS	INTELSAT V- MCS <sup>1</sup>
Contratista principal	Hughes Aircraft	British Aerospace	Ford Aerospace
Lanzamientos	19 / febrero / 1976; 09 / junio / 1976; 14 / octubre / 1976.	A: 20 / dic. / 1981 B: 09 / nov. / 1984	F5: 28 / sept. / 1982 F6: 19 / mayo / 1983 F7: 18 / oct. / 1983 F8: 04 / marzo / 1984
Tipo de lanzador	Delta 2914	Ariane	Atlas Centaur y Ariane
Sitios de lanzamiento	ETR, Florida	CSG, Kourou, Guyana Francesa	ETR y CSG
Tiempo de vida útil	5 años	7 años	7 años
Posición orbital	15°O; 176.5°E; 73°E	26°O; 177.5°E	63°E; 18.5°O; 60°E; 53°O.
Masa inicial ( kg )	655	1006 (A); 1014 (B)	1870
Fuente primaria (W)	330	1000	1800 (EOL)
Frecuencias	250 - 400 MHz 1537.0- 1541.0 MHz 1638.5 -1642.5 MHz 4195.0 -4199.0 MHz 6420.0 -6424.0 MHz	1538.8 -1542.2 MHz 1638.6 -1644.5 MHz 4188.5 -4200.5 MHz 6416.9 -6425.0 MHz	1535.0 -1542.5 MHz 1636.5 -1644.0 MHz 4192.5 -4200.0 MHz 6417.5 -6420.0 MHz
No.de transponde- dores activos	5 (3 UHF; 1 banda-L; 1 banda C)	1 C TOL 1 L TOC	2 (1 C-L; 1 L-C) ambos con banda de 7.5 MHz
PIRE ( dBW)	C (18.8 dBW); L (26.0 dBW - en la banda de potencia media); UHF(28 dBW en banda ancha y 23 dBW en banda angosta);	C (15.7 dBW) L (24.7 dBW)	banda C (20 dBW) <sup>2</sup> banda L (32 dBW) <sup>3</sup>
Estaciones terrestres	3 CES; 12.8 mΩ ~200 terminales marítimas; 1.2 mΩ	~15 CES ~2500 terminales marítimas	~15 CES ~2500 terminales marítimas
Capacidad	Tres canales para UHF; 9 circuitos full duplex para voz y 110 canales para telex cuando la fuerza naval de USA dejó de emplear los canles UHF.	46 canales de voz. Los cuales pueden en lugar de voz transportar entre 25 y 30 mensajes de telex.	35 canales de voz.

<sup>1</sup> La información pertinente sólo a las frecuencias de los transpondedores activos y a la potencia relacionada con el paquete MCS.

<sup>2</sup> PIRE saturado usando portadora única.

<sup>3</sup> PIRE saturado empleando multi-potadoras.

De esta manera, hacia 1996 <sup>1</sup> el consorcio INMARSAT era formado por 79 países miembros y disponía ya de 11 satélites geostacionarios, que incluían tanto los que se encontraban en operación, como los que se tenían en reserva, listos a utilizarse en caso de emergencia. A través de estos, INMARSAT proveía cobertura en más de 135 países <sup>2</sup> a más de 66,000 terminales móviles. Entre ellas, más de 25,000 terminales eran Inmarsat-A, de las cuales aproximadamente 17,600 proporcionaban seguridad y administración en el ámbito marítimo mientras que el resto eran tanto terminales transportables (empleadas principalmente por las agencias internacionales de ayuda humanitaria para trabajo en zonas que carecen de enlaces terrestres fiables) como terminales semifijas (ideales para uso en obras remotas como pueden ser el pentaje tendido, tendido de ductos, construcción y silvicultura, perforaciones y minería), ambas ampliamente utilizadas como sistema de comunicación de reserva en caso de emergencia.

Sin embargo, dicho estándar estaba siendo ya sustituido gradualmente por el estándar digital B; el cual había penetrado de manera significativa, en plataformas de explotación marítimas y operadores de cruceros, quienes generan o reciben un gran volumen de comunicación; así como en los medios de comunicación (p. ej. en transmisión de video y sonido comprimido a través de los enlaces de datos de alta velocidad) e instituciones oficiales que requieren codificación de alta seguridad.

Respecto al estándar C de INMARSAT, se habían probado hasta entonces, cerca de 100 diferentes modelos de sus 40 fabricantes. Por su pequeño tamaño, ligero peso, bajo consumo energético y servicio de destinatario múltiple, que ofrece la posibilidad de añadir un encabezamiento especial al texto e indicar así el grupo de móviles o área geográfica a la que se desea transmitir el mensaje; de las más de 8,000 terminales Inmarsat-C, aproximadamente 3,500 eran portátiles, de gran aceptación en todo el mundo. Destacando sus servicios Fleetnet y Safetynet.

---

<sup>1</sup> Los datos recientes del sistema, serán indicados en el capítulo "Sistemas Geostacionarios Del Siglo XXI".

<sup>2</sup> TELECOMM es miembro autorizado en la venta del servicio Inmarsat desde el 10 de enero de 1994, fecha en que pasó a ser signatario con derecho a voto.

Fleetnet es el servicio de destinatario múltiple que permite el envío simultáneo de información comercial a una cantidad prácticamente ilimitada de terminales móviles predeterminadas, amoldándose perfectamente a las necesidades de comunicación de quienes distribuyen noticias, información bursátil, resultados deportivos, análisis meteorológicos e información de puertos y carreteras. En contraparte, Safetynet dirige los mensajes a una región geográfica específica; facilitando una forma eficiente y económica de transmitir información de seguridad marítima a buques en altamar así como distribuir los servicios de hidrografía, meteorología, guardacostas y búsqueda y salvamiento.

De manera sumamente importante, existían ya más de 7,000 terminales Inmarsat-M producidas por casi 30 fabricantes en aproximadamente 65 diferentes modelos. Por ser el estándar más práctico y económico para aplicaciones personales de telefonía, facsímil y datos; Inmarsat-M ha resultado ideal para periodistas, diplomáticos, viajeros de negocios, patrullas fronterizas, servicios de emergencia y en general, personas que requieran de comunicación de baja capacidad en zonas apartadas donde se carecen de redes fijas o celulares.

Sin duda alguna, el proceso evolutivo de Inmarsat, tanto en el segmento espacial como en el terrestre; continuará, permitiendo al sistema contar cada vez con satélites de mejor tecnología y de mayor capacidad, para satisfacer la creciente demanda generada por las distintas versiones en las terminales móviles que habrán de implementarse en un futuro.

---

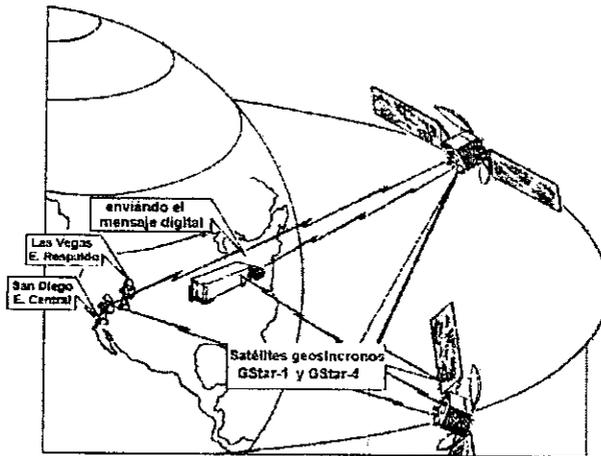
Inmarsat ha anunciado que con el surgimiento de nuevas ideologías y expectativas de mercado, durante la 11a Asamblea Extraordinaria se considero la posibilidad de cambiar la estructura de Inmarsat en un futuro. Mediante dos rondas de votación, se favoreció por el estudio del modelo de Corporación Pública Internacional IPC como posible futura estructura de Inmarsat, apoyado por los signatarios de América Latina, Africa, países Arabes (a excepción de Qatar) y países Europeos como Portugal, España, Francia, Italia, Federación Rusa y la República Checa. Sin embargo también existio una fuerte tendencia hacia la privatización por parte de algunos operadores de CES, Inglaterra y Estados Unidos, la cual continua apoyada, principalmente por este último.

## 2.3 OMNITRACS

Debido al constante riesgo de asaltos y accidentes e incomodidades que representaba para los conductores de trailers, el desviarse de su ruta por más de 45 minutos en tres o cuatro ocasiones al día para reportarse telefónicamente con su central de despacho, así como a las enormes pérdidas generadas por dichos tiempos muertos, acrecentadas aún más por viajes en vacío y tiempos en espera de nueva orden, las compañías transportistas internacionales recurrieron forzosamente al uso de sistemas de comunicación por satélite. Hasta principios de la segunda mitad de los 80's, la única opción radicaba en el empleo de terminales Inmarsat-A adaptadas a los trailers; desafortunadamente, tanto la compra como la instalación de dicho equipo resultaba demasiado costosa para tal aplicación, debido a que el estándar A de INMARSAT había sido diseñado para ser utilizado en grandes barcos, y proporcionar servicio de voz de alta calidad y transmisión de datos a alta velocidad, ambos innecesarios para la transmisión de información requerida entre los trailers y su estación central.

En respuesta a la enorme demanda de comunicación de las compañías transportistas internacionales, y a falta de una terminal móvil práctica, eficiente y económica para este rubro, la organización QUALCOMM Incorporated (San Diego, California) introdujo en 1987 OmniTRACS, el primer sistema geostacionarios en banda Ku (inicialmente a través de los satélites GStar-1 /82° O y GStar-4/103° O), diseñado para proveer a empresas transportistas, servicio de mensajería digital bidireccional utilizando para ello, tecnología de espectro disperso CDMA con salto en frecuencia. (Figura 2.11).

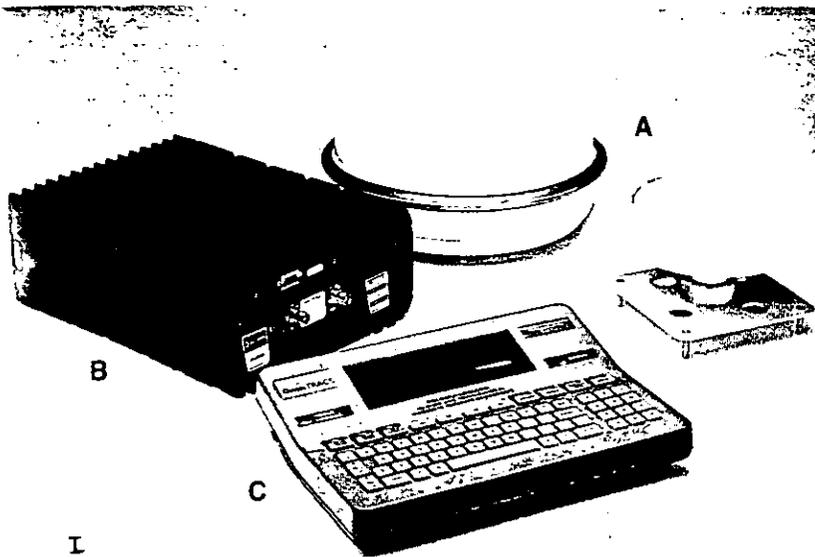
Su estación terrena maestra compuesta por computadoras VAX 6410, utiliza una antena de reflector parabólico de 7.62 m de diámetro para recuperar los mensajes transmitidos por los vehículos a través de satélite; los cuales son posteriormente retransmitidos hacia la central de despacho correspondiente mediante enlaces telefónicos convencionales. Una segunda antena, ésta de 3.66 m de diámetro también de reflector parabólico, es empleada para enviar una señal tren de pulsos hacia dos satélites que orbiten sobre el vehículo; los cuales transmiten dicha señal a la terminal móvil para que ésta mida la diferencia de tiempo entre las señales recibidas (provocada por la distinta distancia recorrida por ambas señales, y por el efecto doppler debido al movimiento relativo entre la órbita y el vehículo) y de forma de reporte digital retransmita este dato hacia la estación terrena, donde se realiza el cálculo automático de la longitud y latitud del vehículo con un error menor a 100 m.



**Figura 2.10** El reporte de posición por satélite se envía automáticamente hacia la central de despacho a cada hora, para facilitar a la compañía transportista una óptima administración de los fletes. En caso de no existir 2 satélites que brinden cobertura o bien de requerir de una mayor precisión en la posición, es posible disponer del sistema GPS de triangulación, Navstar.

El equipo de comunicación del sistema OmniTRACS (Figura 2.11) incluye:

- A. Antenas de comunicación y de posicionamiento satelital: Ambas están diseñadas para uso rudo y se encuentran protegidas por un domo de acrílico aerodinámico. Para lograr una comunicación de datos sin error y con gran confiabilidad, la antena direccional es constante y permanentemente dirigida hacia el satélite mediante un pequeño motor y un sensor de frecuencia.
- B. Terminal móvil de comunicación: Es una unidad de cómputo formada por un decodificador "Viterbi" y un microprocesador Intel C186. Adicionalmente es capaz de recibir e interpretar la señal del sistema GPS.
- C. Pantalla con teclado para el operador: Permite al conductor del vehículo enviar y recibir mensajes de hasta 1,900 caracteres. Cuenta con capacidad para preprogramar hasta 63 mensajes que pueden ser interactivos, facilitándole llenar sólo los espacios en blanco y enviar. Además, el teclado que incluye teclas numéricas, cuenta con una señal de alerta audible y un indicador visual que notifica si hay un mensaje en espera. Recientemente y con la intención de satisfacer aún más a sus clientes, OmniTRACS dispone opcionalmente de una pantalla mejorada para el conductor (Tabla 2.3).



I

SmartCard reader/writer will store data  
when used with scan to be reflected  
advanced wizard computer.

15-line x 40-character display  
features larger, easier-to-read text,  
as well as graphics capability.

One-touch "soft" keys  
simplify menu selection.



Sealed keyboard protects  
against spills.

Wider keyboard and key spacing  
permits quick, reliable data  
entry with glove use.

Keys are backlit for easier  
night-time use.

II

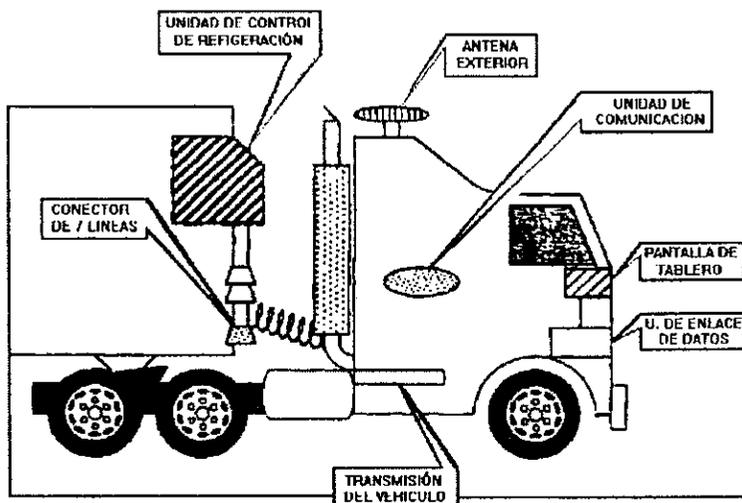
**Figura 2.12** I) Equipo básico que conforma la terminal móvil del sistema OmniTRACS. II) Nueva pantalla opcional con interface flexible para cómputo avanzado a bordo de la unidad, la cual incluye gráficas y pantalla configurable. (Cortesía de OmniTRACS y QUALCOMM Incorporated.)

**Tabla 2.3** Especificaciones técnicas principales del equipo básico empleado por el sistema OmniTRACS.

<b>Antena de comunicación satelital</b>	<b>Antena de GPS</b>	<b>Terminal móvil de comunicación</b>	<b>Pantalla estándar para el operador</b>	<b>Pantalla mejorada para el operador</b>
<p>Antena de corneta que opera en la banda Ku. Sensor automático de frecuencia. Dimensiones(cm): 29.21 x 17.145 Peso: 4.999 Kg</p>	<p>Antena direccional Localizador auto. de posición con base en coord. geográficas. Dimensiones (cm): 11.748 x 15.24 Peso: 0.675 Kg</p>	<p>Mensajes de hasta de 1,900 caracteres Memoria para 256 líneas o 99 mensajes. Memoria para envío simultáneo de hasta tres mensajes. V. de operación: ±12V DC Temp: -30° a 70° C. Construcción: Aluminio reforzado con ventillas de enfriamiento. Interfaces de comun: Dos RS-232, un 422 (para el tablero) y un Rs 485 (para el SAE J 1708) Dimensiones (cm): 32,36 x 23.5 x 11.4 Peso: 7.25 Kg</p>	<p>Pantalla: LCD, 4 líneas con iluminación, 40 caracteres por línea. Tablero: 64 teclas con protección elastomé-trica contra aplicación de líquidos y contaminantes. Dimensiones (cm): 29.845 x19.05 x 6.985 Peso: 1.13 Kg</p>	<p>Pantalla: LCD, 15 líneas con iluminación, 40 caracteres por línea; 320 x 240 pixeles. Tablero: 70 teclas tipo estándar a contraluz y también sellado contra derrames. Tarjeta inteligente y removible para expandir la memoria de almacenamiento. Dimensiones (cm): 32 x 23.25 x 5.5. Peso: 1.36 Kg</p>

Aunque de manera opcional es posible disponer de un botón de emergencia, alarma remota, impresora y lectora de código de barras; por sus inmediatos beneficios destacan dos unidades. Una de estas consiste de un localizador con cobertura de 30 m alrededor del vehículo, con el cual es posible recibir los mensajes que llegan a la terminal móvil, permitiendo al operador tomar un descanso con la seguridad que será informado cuando exista un nuevo viaje.

La otra unidad opcional es aún más empleada. Se trata de una serie de sensores integrados en varios módulos, comúnmente conocidos como sistema de información vehicular (VIS), los cuales se encargan de monitorear e informar automáticamente tanto al conductor como a la central, sobre el estado actual del vehículo mediante un reporte global electrónico. Generalmente, el sistema VIS dispone de hasta 7 conectores hacia la terminal móvil (Figuras 2.13 y 2.14), permitiendo integrar los módulos en el mismo compartimiento, en la transmisión del vehículo e inclusive dentro de la misma cabina del conductor. Ello con la finalidad de medir y reportar tanto la velocidad de revolución del móvil como la presión y temperatura del aceite, la temperatura del refrigerante, la temperatura del aire entra al compartimiento, la corriente o dispositivos de algún sistema de refrigeración, etc.



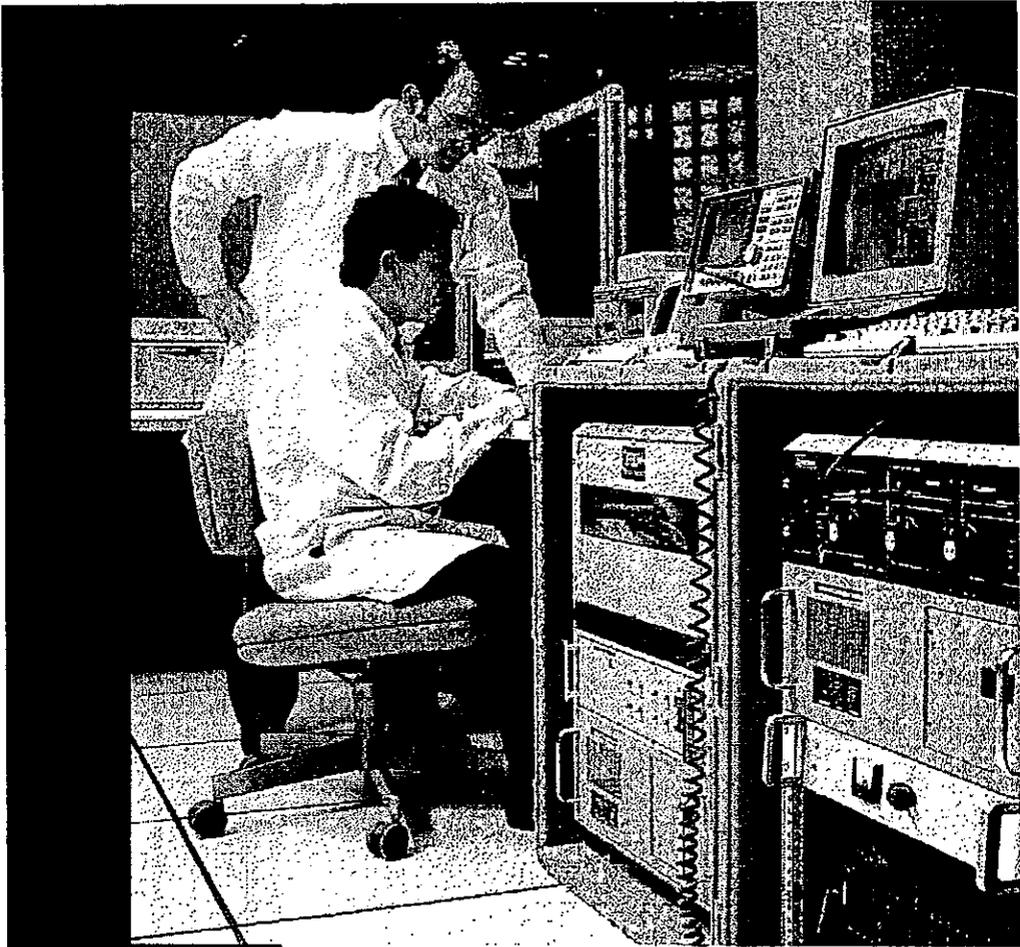
**Figura 2.13** Instalación del equipo básico de la terminal móvil de OmniTRACS y una posible configuración del sistema VIS en un trailer.



**Fig. 2.14** Unidades de transporte equipadas con el sistema OmniTRACS para una eficiente comunicación con su central, la cual puede brindar invaluable información para un mejor recorrido además de apoyar al instante en caso de existir algún percance. (Cortesía de OmniTRACS.)

Además de la terminal móvil, el sistema OmniTRACS provee a la central de despacho de una enorme pantalla de video y de un amigable programa de cómputo disponible para PC, LAN, AS/400, S36, ESA, PICK y varias plataformas UNIX (Figura 2.15). Aunque el programa OmniTRACS ofrece diversas facilidades, destacan de manera especial:

- la presentación de un resumen de posición, origen y destino de todos los vehículos;
- la asignación de códigos de color para agrupar a las unidades por flotillas, regiones o zonas y de esta manera visualizarlas mediante la pantalla, dentro de un mapa geográfico;
- diferentes acercamientos (de hasta 64 por 45 Km cuadrados) para apreciar en detalle la posición de los vehículos e inclusive solicitar información de una unidad determinada colocándose sobre la marca a través de las flechas del teclado;
- y la delicada descripción del mapa, que no sólo muestra las principales ciudades y poblados, las carreteras de cuota, federales, estatales y vecinales, sino también permite agregar puntos de interés, tales como bodegas, gasolineras o ubicación de clientes.



**Figura 2.15** Las facilidades del programa de cómputo OmniTRACS permiten a los operadores de la unidad central visualizar el envío y respuesta de mensajes, así como localizar a las unidades dentro de un detallado mapa geográfico. (Cortesía de OmniTRACS.)

Adicionalmente, el programa OmniTRACS permite al despachador programar la terminal móvil de cualquier vehículo vía satélite para:

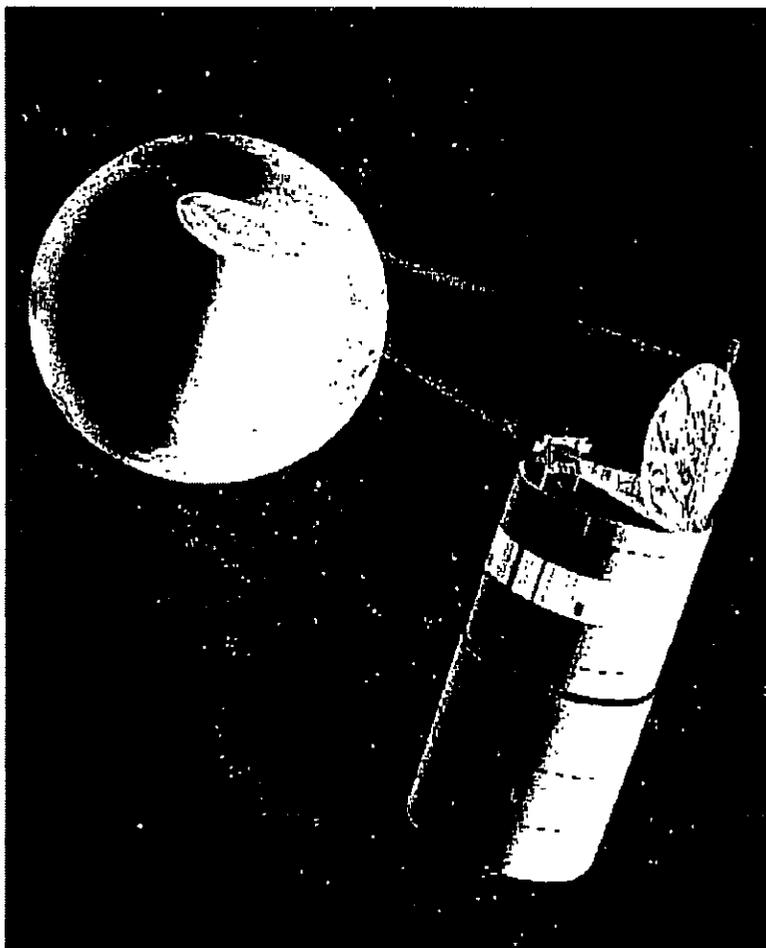
- determinar el tiempo que la terminal móvil permanezca encendida después de haber sido apagado el motor;
- fijar los intervalos de activación de la terminal móvil;
- seleccionar el volumen y la frecuencia de la alarma remota;
- y establecer mensajes con clave para casos de información confidencial.

Así, gracias a la información obtenida tanto por los datos transmitidos por la unidad móvil, como los enviados por el sistema GPS y VIS, contribuye no sólo a la óptima administración de los vehículos evitando viajes vacíos o semi-vacíos y tiempos muertos, sino que proporcionan una enorme seguridad a las unidades y a quienes las operan.

En México, el sistema OmniTRACS inició su servicio satelital con el establecimiento de MOVILSAT, una empresa concesionada por QUALCOMM para la venta de su servicio satelital. MOVILSAT, una empresa con propiedad mayoritaria de Televisa, comenzó a operar con muy poca respuesta, a menos de 50 terminales móviles que mantenían comunicación a través de la cobertura del satélite Morelos-1 y el uso de antenas de escuadra con dipolo vertical. Posteriormente en diciembre de 1993, ya como OmniTRACS, cambió su carga hacia el satélite Morelos-2 (Figura 2.16), para finalmente en enero de 1994 enlazarse con Solidaridad-1, el cual hasta la fecha conserva para proveer comunicación a las cerca de 2000 terminales móviles.

Actualmente el sistema satelital de QUALCOMM presta sus servicios de comunicación a más de 600 compañías de transporte y diversos clientes en los Estados Unidos, Canadá, Europa, Japón, Brasil, Malasia y Corea. De contar en 1995 con 40,000 terminales instaladas en enormes trailers, minivans, automóviles y hasta en pequeños barcos; su venta de terminales OmniTRACS a la fecha, asciende a más de 165,000.

De igual forma que en México (mediante OmniTRACS), QUALCOMM ofrece también en Europa adecuadas versiones de las terminales móviles de su sistema satelital OmniTRACS a través de la empresa EUTELTRACS.



**Fig. 2.16** Los satélites Morelos-1 y Morelos-2, ambos versiones del modelo HS 376 de Hughes fueron lanzados en junio y noviembre de 1985, respectivamente, e inicialmente permitieron la operación del sistema OmniTRACS en México a través de la organización MOVILSAT, predecesora de la actual empresa OmniTRACS de México. (Cortesía de TELECOMM.)

## 3

**VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ORBITA  
GEOESTACIONARIA****3.1 ANALISIS DE PROPAGACION DE UNA SEÑAL SATELITAL**

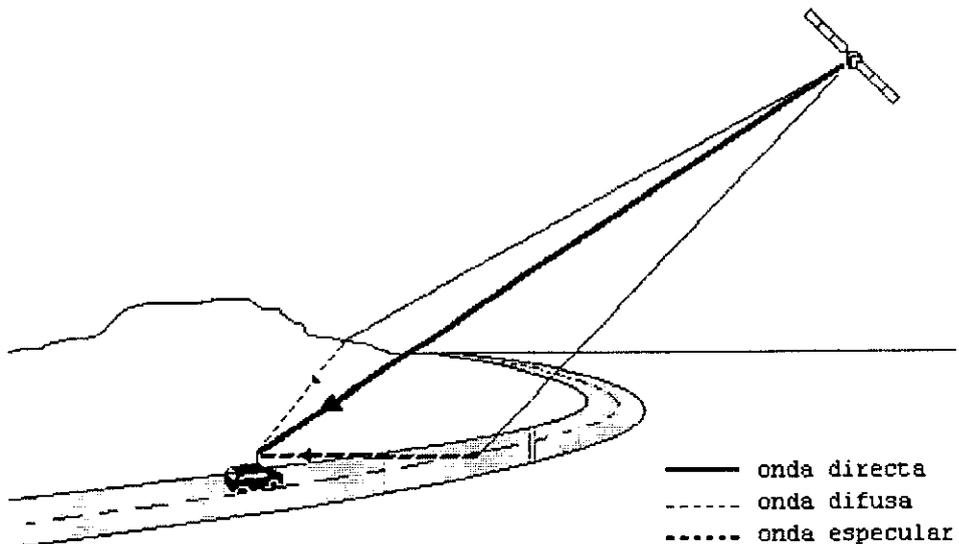
Para ponderar correctamente las características de una órbita terrestre cualquiera y definir sus ventajas y desventajas particulares dentro de un sistema móvil satelital, no basta el considerar únicamente las perturbaciones del espacio, aun cuando estas son determinantes en la composición y operación de los satélites; también es necesario, analizar la particular propagación de la señal satelital, pues en base a ésta son establecidas la potencia del enlace y la complejidad de los sistemas de transmisión y de recepción. Por tal razón, resulta conveniente mencionar las causas que alteran la transmisión de la señal satelital. A primera vista, resaltan cuando menos dos fenómenos a considerar:

1. La disminución de la densidad electromagnética de la señal satelital a causa de la dispersión esférica de la onda de radio y de la distancia (s) del enlace ( $1/4\pi s$ ). Esta, generalmente se expresa asociada con la longitud de onda ( $\lambda$ ) o con la frecuencia ( $f$ ) de la señal portadora en un termino conocido como pérdida por espacio libre ( $L_p$ ), que facilita el cálculo de la ganancia en potencia de las antenas transmisoras y receptoras del sistema.

$$L_p = \left[ \frac{4 \pi \cdot s}{\lambda} \right]^2 \quad (3.1)$$

- Las condiciones atmosféricas, tales como la densidad de electrones libres, las precipitaciones de lluvia y nieve, y la presencia de nubes y neblina, que causan refracción atmosférica, rotan los ejes de polarización de la señal (rotación de Faraday) y le restan energía a sus campos electromagnéticos, dependiendo de las características de la misma, del área y las condiciones de propagación presentes (estas atenuaciones son consideradas en los márgenes de confiabilidad del enlace).

Sin embargo, el análisis de propagación del enlace satelital de comunicación móvil debe ser más completo. En primer instancia, porque existe una variación importante en la amplitud y en la fase de la señal recibida a consecuencia del cambio de posición de la terminal móvil respecto a su entorno. Pues, mientras la intensidad de la señal satelital es parcialmente atenuada por la presencia de obstáculos en la trayectoria de propagación, la curvatura y las características físico eléctricas de la superficie terrestre interactúan con el ángulo y la polarización de la onda incidente, determinando el comportamiento de las señales reflejadas por efecto de multitrayectoria, las cuales a su vez conforman la onda difusa y la onda especular que inciden en el receptor móvil (Figura 3.1).



**Figura 3.1** La onda especular está compuesta por las ondas reflejadas que inciden en una área regular a la altura media de la superficie, y la onda difusa la integran el resto de los rayos dispersados aleatoriamente por la superficie.

La otra razón, por la cual es necesario detallar el estudio de propagación se debe al efecto Doppler <sup>1</sup>, ya que debido al movimiento relativo entre la terminal y el satélite, se produce un significativo desplazamiento ( $f_D$ ) en la frecuencia de la señal transmitida, que mantiene la siguiente relación:

$$f_D = \frac{vf \cos \theta}{c} \quad (3.2)$$

donde:

$v$  - velocidad relativa entre el satélite y la terminal móvil.

$c$  - velocidad de la luz,  $c = 3 \times 10^8$  m/s.

$\theta$  - ángulo azimut entre la dirección de la señal recibida y el movimiento de la terminal.

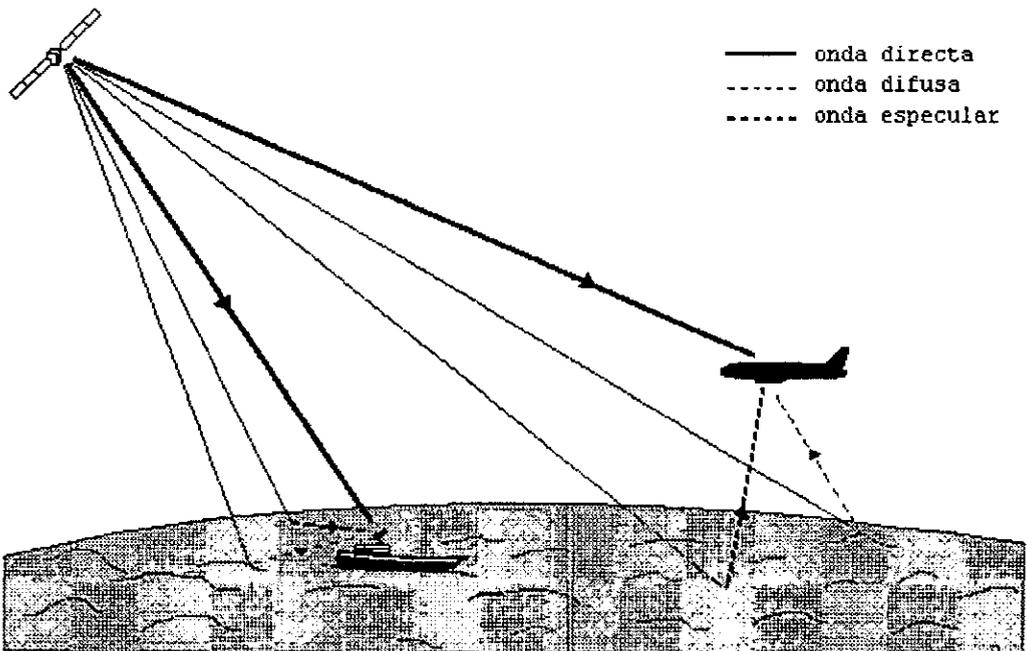
De esta manera, se tienen variaciones diferentes dependiendo del entorno y de la velocidad de la terminal móvil. Cuando ésta se desplaza vía terrestre (típicamente a 1 m de altura sobre el terreno), recibe la señal satelital principalmente a través de la onda directa, pues la atenuación debida a construcciones en áreas urbanas, a la densa vegetación en áreas rurales, y a montañas, valles y riscos en áreas despejadas; reduce considerablemente la energía de la onda difusa y de la onda especular, que son además discriminadas parcialmente por la directividad de la antena receptora.

En contraste, un medio marítimo difícilmente presenta obstrucciones que atenúen la señal satelital, pero el índice de refracción del agua facilita la reflexión de las ondas incidentes sin restarles demasiada energía. Afortunadamente la onda especular existe sólo para bajos ángulos de elevación (menores de  $10^\circ$ ) cuando la superficie del mar esta casi en calma total, lo cual no es muy común; mientras que la onda difusa, generada por las refracciones con la estructura del barco y la inestable superficie del mar, puede ser radicalmente evitada por la directividad de la antena al aumentar el ángulo de elevación de la misma (véase la figura 3.2).

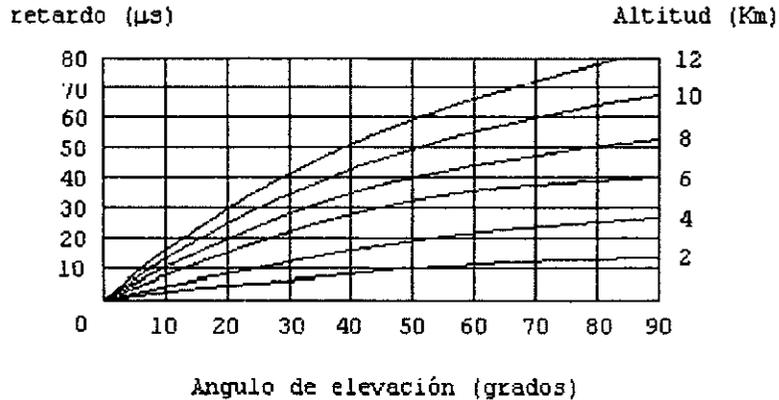
---

<sup>1</sup> Al existir un movimiento relativo entre una fuente y un observador, en una emisión de ondas, la frecuencia de la misma presenta un aparente incremento cuando existe un acercamiento, y viceversa.

A diferencia de los dos medios anteriores, donde la interferencia entre la onda directa y las ondas reflejadas producen variaciones instantáneas en la amplitud y en la fase de la señal recibida, un ambiente aéreo se caracteriza por la gran diferencia en el retardo de propagación entre la onda directa y las ondas difusa (la onda especular es despreciable la mayor parte del tiempo, debido a la irregularidad de la superficie), el cual puede causar interferencia intersimbólica en la señal recibida cuando excede el período de un símbolo, limitando así la tasa de transmisión (Figura 3.2). Esta diferencia depende del ángulo de elevación y de la altitud de la aeronave como se muestra en la figura 3.3.



**Figura 3.2** Generalmente, la superficie del mar es bastante irregular y dificulta la formación de la onda especular.



**Figura 3.3** Diferencia en el retardo de propagación como función del ángulo de elevación y de la altitud. (Lodge, J., "Modulation for Aeronautical Mobile Channels", FANS WG/B Report, Noviembre 1986.)

Otro aspecto típico de este medio, es que la terminal se desplaza a una velocidad mucho mayor, y por tanto el efecto Doppler aumenta considerablemente, aun para la onda difusa, que experimenta un rango de variación  $(B_D)^1$  en la frecuencia:

$$B_D = 2 f \frac{v \cdot \alpha}{c} \sin \theta \quad (3.3)$$

donde:

$f$  - frecuencia portadora

$v$  - velocidad de la terminal (misma que la de la aeronave)

$c$  - velocidad de la luz

$\alpha$  - curvatura media de la superficie

$\theta$  - ángulo de incidencia respecto al movimiento de la terminal.

<sup>1</sup> Para un enlace bilateral típico, el desvanecimiento genera un rango de 200 Hz, mientras que en atenuaciones extremas se presentan rangos no mayores de 600 Hz.

En base a lo mencionado en el presente tema, podemos afirmar que las variaciones a causa del movimiento de la terminal en cualquier medio, alteran la señal recibida, pudiendo causar ruido y distorsión intolerable en la transmisión de voz, o bien, altas tasas de error en la transmisión de datos. Desafortunadamente, la forma y el tamaño de la antena receptora está sujeta a características que faciliten la comodidad y el movimiento de la terminal, por lo que difícilmente se pueden cambiar sus dimensiones para aumentar su capacidad de percepción. Por otra parte no siempre es posible aumentar la potencia de la señal satelital, ya que esto podría causar intermodulación en el transpondedor. Por ello, además de recurrir a técnicas especiales de procesamiento de señales, es necesario considerar las ventajas y las desventajas que presentan las diferentes órbitas terrestres.

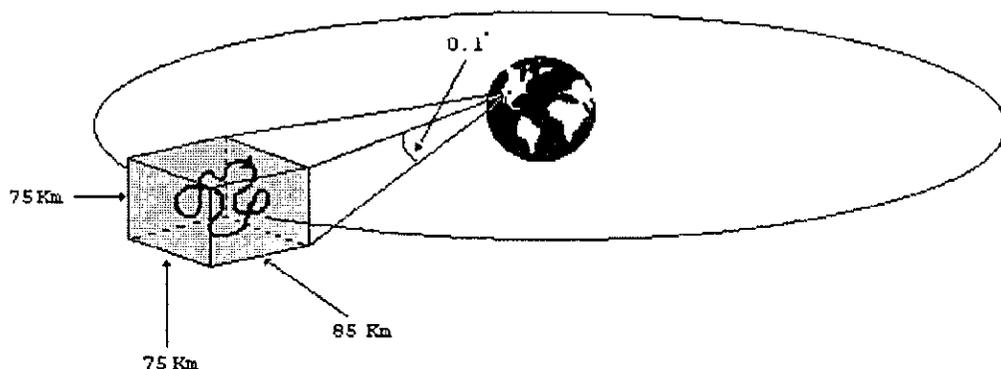
### 3.2 VENTAJAS DE LA ORBITA GEOESTACIONARIA

Las ventajas de la órbita geoestacionaria se derivan básicamente de la posición pseudo fija que adoptan los satélites respecto a cualquier punto fijo en la Tierra. Dicha característica favorece la propagación de las señales de comunicación, pues el efecto Doppler tiene una menor repercusión debido a los ligeros movimientos que realizan los satélites en esta órbita. Por otra parte, al asumir que el satélite debería estar fijo en la órbita, el espacio de holgura asignado a sus movimientos (75 x 75 x 85 Km) es también fijo respecto a la Tierra, esto disminuye los requerimientos de precisión en los sensores de orientación del satélite <sup>1</sup> y facilita la orientación de las antenas terrestres, simplificando así, la operación de los subsistemas de rastreo <sup>2</sup>, de telemetría y de comando de la estación terrena de control, única ya que el satélite siempre se encuentra en línea de vista con ésta (véase la figura 3.4).

---

<sup>1</sup> Estos pueden ser sensores solares (dispositivos fotovoltaicos que miden la corriente eléctrica cuya magnitud depende de la dirección de la radiación solar) y sensores de Tierra (miden la radiación infrarroja emitida por el planeta, detectando los cambios bruscos que ocurren en los bordes del horizonte terrestre). Prescindiendo así, de los avanzados sensores de radiofrecuencia, que detectan y miden la diferencia angular entre el eje principal de radiación de la antena del satélite y la trayectoria de las ondas de radio transmitidas por el radiofaro terrestre.

<sup>2</sup> El período de muestreo en el sistema de rastreo puede ser menor que el de cualquier otra órbita en base a la posición pseudofija del satélite. Pudiéndose reducir la tasa de información técnica del satélite y en consecuencia disminuir el consumo de energía para la misma.



**Figura 3.4** Los movimientos del satélite están limitados a un espacio de coordenadas fijas respecto a la Tierra.

Otra ventaja de esta órbita, es la enorme cobertura que puede tener un satélite, pues debido a la altitud de casi 36,000 Km (coordenadas terrestres) éste mantiene línea de vista con casi todo el hemisferio terrestre visible (véase la figura 1.12), exactamente con el 41 % de la superficie del planeta. Este hecho hace posible disponer de cobertura pseudo global (excepto los polos) con sólo 3 satélites separados  $120^\circ$  entre sí, como se muestra en la figura 3.5.



**Figura 3.5** Cobertura pseudo global de un sistema geoestacionario.

La órbita geoestacionaria, presenta también menores perturbaciones del globo terrestre y de la presencia de meteoritos que otras órbitas de menor altitud. Sin embargo, éstas serán consideradas en su momento, como lo que realmente son, desventajas en órbitas no geoestacionarias de menor altitud.

### 3.3 DESVENTAJAS DE LA ORBITA GEOESTACIONARIA

#### 3.3.1 Satelización

(Inyección de un artefacto espacial en órbita alrededor de un astro)

Al hablar de las ventajas y desventajas de una órbita en particular, generalmente asumimos que los satélites alojados en ella, funcionan correctamente de acuerdo a su diseño; cuando en realidad, existen en el proceso de satelización, variantes a veces incontrolables, como las fuerzas de reacción a causa del consumo irregular del combustible sólido empleado, que pueden afectar gravemente la estructura de alguno de los subsistemas del satélite durante el proceso, impidiendo su óptimo funcionamiento o inclusive eliminar cualquier posibilidad de uso.

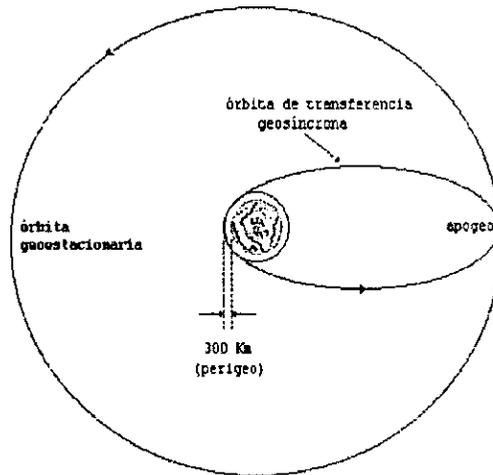
Por prescindir de los esfuerzos propios del satélite, la satelización por inyección directa siempre provee la mayor probabilidad de que el satélite arribe a su órbita sin daños. Desafortunadamente, es aquí donde la órbita geoestacionaria presenta su primera desventaja pues, debido a la altitud de la misma, la inyección directa requiere el uso de potentes cohetes multietapas como lo es el Titan IIIC de los E.U.A. <sup>1</sup>, que por su complejidad de diseño, necesidades de lanzamiento y consumo de combustible, elevan bastante el costo de satelización; el cual, generalmente resulta justificable sólo para satélites militares donde la sensibilidad de sus subsistemas son vitales en el desarrollo y en la seguridad de una nación.

Aun cuando existen otros procedimientos de satelización más económicos, basados en el uso de cohetes menos potentes y principalmente de una órbita de gran excentricidad (órbita de transferencia geosíncrona) que conecta a la órbita geoestacionaria con alguna órbita terrestre baja de aproximadamente 200 o 300 Km de altitud sobre el nivel del mar (Figura 3.6), estos implican riesgos mayores durante el proceso de satelización debido al impulso generado por los motores acoplados al satélite, necesarios para modificar la órbita del mismo y guiarlo hasta su posición final en la órbita geoestacionaria.

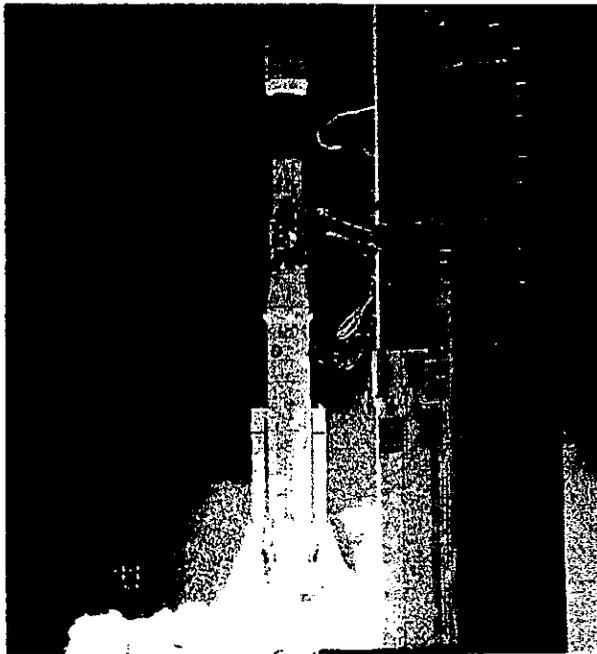
De tal manera, la satelización en órbita geoestacionaria es un proceso sumamente costoso o bien, bastante inseguro, dependiendo el tipo de inyección que desee emplearse.

---

<sup>1</sup> El cohete Titan IIIC, recurre al uso de dos aceleradores diametralmente opuestos para incrementar el empuje del lanzador.



**Figura 3.6** Para realizar inyección inicial en órbita elíptica, es posible el uso de cohetes Ariane 4 de la Agencia Espacial Europea Arianespace, cohetes Delta de McDouglas, Atlas IIA, Protón y otros, mientras que los orbitadores de la NASA resultan ideales para el proceso de inyección en órbita circular baja.

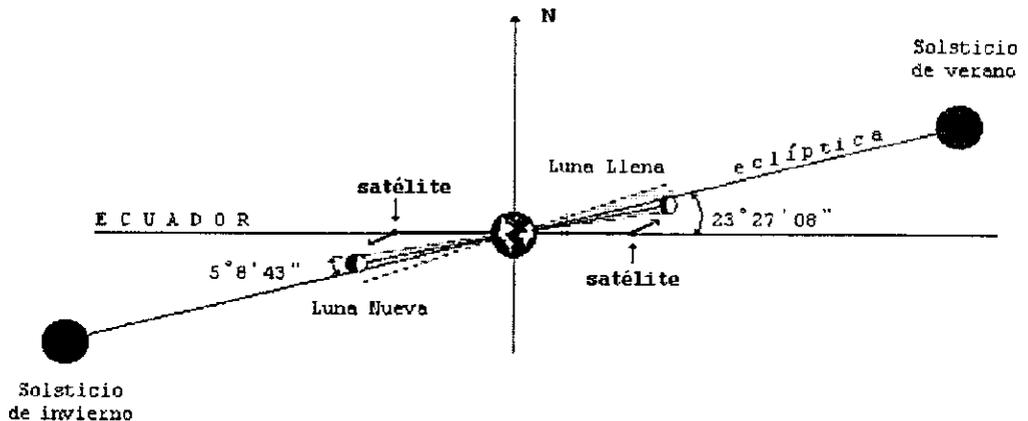


**Figura 3.7** Cohete Ariane-4. Posee 47 m de altura, 3.8 m de diámetro (1a. etapa), 207 t de masa y 245 t de empuje al despegar; Este es capaz de llevar a bordo dos satélites con una masa máxima de 4.4 toneladas. (Cortesía de Arianespace.)

### 3.3.2 Plano ecuatorial terrestre

Para mantener una posición pseudofija respecto a la Tierra, es imperativo que el satélite orbite al planeta siguiendo el sentido de rotación del mismo. Por tal razón, la órbita geostacionaria está contenida en el plano ecuatorial terrestre. Esta esencial característica no sólo limita la latitud de la ubicación de las bases de lanzamiento, al favorecer aquellas cercanas al ecuador que permiten disminuir el combustible del lanzador y aumentar el destinado a corregir la posición orbital del satélite (ampliando dos o más años su vida útil); también, deriva significativas desventajas, destacándose entre ellas, la falta de cobertura satelital en las zonas polares debido a la inexistente línea de vista entre la órbita y dichas áreas del hemisferio, pues la tangente del globo terrestre limita la cobertura de una antena a un ángulo de  $17.4^\circ$ , el cual permite línea de vista con latitudes no mayores a  $81.3^\circ$  en la órbita geostacionaria (véase la figura 3.5).

Otra importante desventaja, es la inclinación positiva de las órbitas geocéntricas de la luna y del sol, respecto al ecuador del planeta; pues a causa de las diferencias en plano y período orbital con el satélite, los campos gravitacionales de los respectivos astros (principalmente el campo lunar), tienden a inclinar anualmente al satélite entre  $0.75^\circ$  y  $0.95^\circ$  (Figura 3.8), siendo necesario un incremento anual de 50 m/s en la velocidad del vehículo espacial, para corregir su trayectoria y evitar que salga del plano ecuatorial.



**Figura 3.8** Atracción de la Luna y del Sol sobre los satélites geostacionarios. El combustible consumido para la corrección de estas perturbaciones, en combinación con las del irregular campo gravitacional terrestre (aún menores), oscila entre el 20 y el 40% de la masa total del satélite.

### 3.3.3 Congestión de la órbita

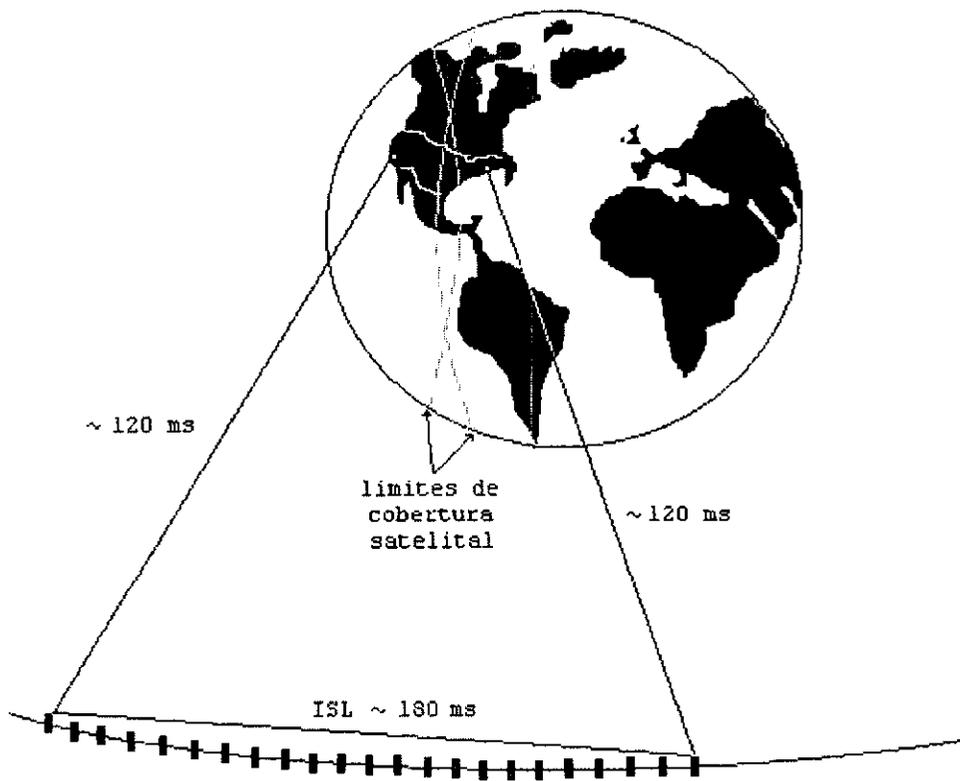
Finalmente, podemos citar la desventaja de menor peso en los actuales estudios de un sistema satelital a causa del plano ecuatorial, pero a su vez, la de mayor importancia a futuro, ya que limitará el uso de cualquier servicio satelital en la órbita geoestacionaria. Nos referimos al congestionamiento de la órbita.

Es obvio que la comunicación satelital requiere línea de vista y que en un enlace de mayor distancia la señal disminuye su intensidad e inclusive sufre severas distorsiones según el medio de propagación. Por ello, es ideal lograr que la señal satelital viaje lo menos posible, en especial dentro de la atmósfera terrestre, pues es aquí donde existen todos los fenómenos que pudieran alterarla. La solución es entonces, procurar que la latitud y longitud del satélite sean lo más cercanas a las de las terminales terrestres. En otras palabras, colocar al satélite justamente sobre el área de servicio. Desafortunadamente, las actividades humanas que exigen de comunicación, están concentradas, inclusive en los desiertos y en rutas determinadas sobre los mares del planeta, propiciando la concentración de satélites geoestacionarios sobre las respectivas longitudes <sup>1</sup>.

Una alternativa a futuro, para obtener los mismos resultados sin tener al satélite geoestacionario sobre el área deseada, pudiera ser factible haciendo uso de un enlace inter-satelital (ISL Inter-Satellite-Link) y cuando menos de dos satélites alojados cerca del área en cuestión, como se aprecia en la figura 3.9. Sin embargo, esta técnica tendería de manera análoga, a saturar ahora los extremos del área de interés; además, implicaría gastos mayores y en particular, los servicios de comunicación móvil personal serían bastante deficientes debido al enorme retardo de propagación a causa del enlace intersatelital.

---

<sup>1</sup> Actualmente orbitan más de 345 satélites de comunicación en el cinturón de Clarke. La zona de mayor tráfico internacional corresponde a la del océano Atlántico, debido a que en sus litorales se encuentran los países industrializados de América del Norte y Europa. Por su parte, la variedad y cantidad de servicios existentes en México, E.E.U.U y Canadá demandan el mayor tráfico interno vía satélite, congestionando la sección del arco ecuatorial correspondiente a dichas longitudes.



**Figura 3.9** Ejemplo de cobertura total de los Estados Unidos en caso de saturación del arco orbital geostacionario, a través de un futuro ISL (alternativa técnicamente posible para el año 2010.)

### 3.3.4 Altitud de la órbita

Habiendo resaltado las desventajas más comunes de la órbita geoestacionaria, podemos ahora enfocarnos en aquellas derivadas de la altitud de la órbita, que trascienden de manera relevante en la implementación de un sistema satelital de comunicación personal.

El primer factor desfavorable, es la ineficacia de los servicios de comunicación personal (principalmente la telefonía) a consecuencia del inherente retardo de propagación del enlace pues éste, además de alcanzar los 278 ms en una comunicación unilateral entre dos puntos de latitudes extremas opuestas (típicamente saltos de 138.9 ms y de 119.3 ms como mínimo), se duplica para comunicaciones bilaterales y aumenta aún más al emplear ISL o requerir de varios saltos con el o los satélites.

Pese a tal inconveniente, la principal desventaja de la órbita geoestacionaria es sin duda la enorme atenuación por dispersión de energía a causa de la distancia del enlace. La siguiente tabla muestra en resumen el enlace de un típico sistema geoestacionario de comunicación móvil.

**Tabla 3.1** Estimación de un enlace típico de un sistema satelital móvil. (Miller, Satellite Communications, Kluwer Academic Publishers, 1993.)

	terminal - satélite	satélite - terminal
<b>Satélite</b>	receptor $G/T^* = -2.0$ dB/K	transmisor PIRE* = 24.5 dBW
-margen de atenuación- cte.de Boltzmann <sup>1</sup> - C/No <sup>2</sup> requerida (para 6600 bps voz)= - 50 dB + 228.6 dB - 47.7 dBHz = + 175.9 dB		
LP (banda L)	-188.7 dB	
→ Terminal	transmisor PIRE = 14.8 dBW	receptor $G/T^* = -11.7$ dB/K

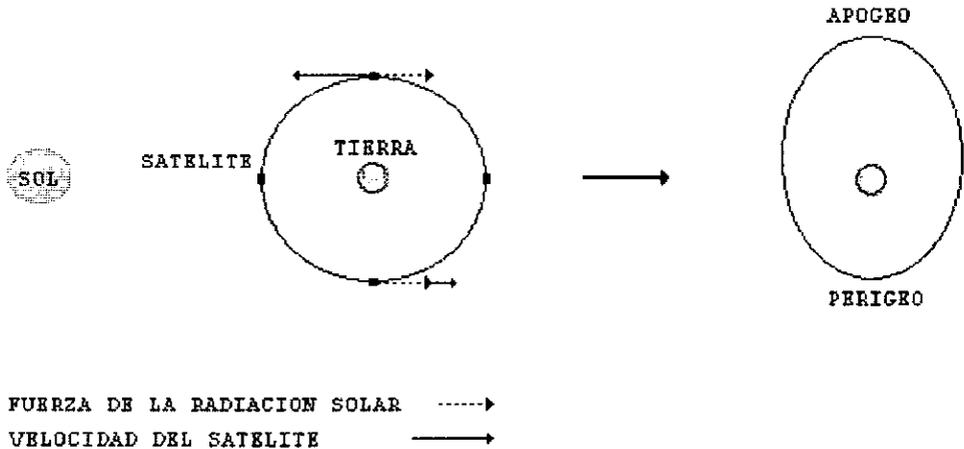
<sup>1</sup> La ecuación de Boltzmann es una relación algebraica que expresa que la entropía (grado de incertidumbre o arbitrariedad en un sistema) de un sistema es proporcional al logaritmo neperiano de la probabilidad de su estado macroscópico; la constante de proporcionalidad es precisamente la constante de Boltzmann, igual a:  $1,371 \times 10^{-16}$  ergio por grado.

<sup>2</sup> C/No es un parámetro proporcional a la tasa máxima de información transferible mediante una portadora, sin tomar en cuenta el ancho de banda. Su relación indica en buen medida el desempeño del enlace de radiofrecuencia. En transmisiones digitales el término Eb/No es análogo.

\* Consúltese el glosario

Al analizar los datos de la tabla y el tipo de terminales que requiere un sistema de comunicación personal (PIRE  $\sim 8\text{dBW}$  y  $G/T \sim -18\text{dB/K}$ )<sup>1</sup>, considerando las pérdidas por trayectoria virtualmente como constantes, la modificación del sistema queda sujeta al desempeño del satélite y al de las terminales móviles.

Para lograr un mayor rendimiento funcional del satélite, es necesario mejorar tanto el PIRE como la relación  $G/T$  del mismo, una primera opción es el uso de circuitos más potentes; sin embargo, esto implica generar una mayor potencia de alimentación a través de grandes paneles solares, los cuales desafortunadamente incrementan el efecto de rotación y aceleración del satélite debido a la presión de la radiación solar (principal perturbación en la órbita geoestacionaria), alterando aún más la excentricidad de la órbita (Figura 3.10).



**Figura 3.10** Efecto de la presión de la radiación solar sobre la excentricidad de una órbita circular terrestre a causa de la incidencia del viento solar sobre los paneles solares del satélite. Dicho efecto depende de la cantidad e inclinación de los fotones incidentes, así como del coeficiente de reflectividad y la masa del satélite.

<sup>1</sup> Fuente: Miller, Satellite Communications "Mobile and Fixed Services" , Kluwer Academic Publishers, 1993.



Las dos alternativas anteriores, limitadas por el comportamiento del receptor satelital ante la temperatura de ruido <sup>1</sup> de la antena, son también restringidas por la complejidad y el costo que derivan, así como por la masa del satélite y el tipo de vehículo de lanzamiento a utilizar. No obstante, éstas representan las más viables opciones para implementar un sistema satelital geoestacionario de comunicación personal, pues las modificaciones pertinentes a las terminales móviles únicamente podrían orientarse hacia un incremento en la banda de frecuencias, tentativamente hacia la banda Ka (26-40 GHz), donde la antena tendría una ganancia de 20 a 25 dB y podría operar a través de un sistema satelital geoestacionario de haces múltiples con antenas de tamaño moderado. Desafortunadamente, en esta banda las perturbaciones atmosféricas son mayores, mientras que los transmisores son de baja eficiencia debido a la falta de tecnología; además, existe incompatibilidad con los estándares de los actuales sistemas personales terrestres y en especial, se ha demostrado que a dichas frecuencias, la radiación tiene un elevado poder de penetración o de ionización el cuerpo humano <sup>2</sup>, capaz de alterar órganos sensibles como la retina, generadora de los fenómenos de visión, y el sistema nervioso entre otros.

Para finalizar este capítulo, es necesario resaltar que las características de un sistema geoestacionario fueron en primera instancia, aspectos imperativos para la operación básica de un sistema de comunicación satelital móvil debido a la falta de tecnología en otras órbitas; lo cual nos advierte que las ventajas de dicha órbita están sustentadas por la características del movimiento de un cuerpo (satélite) bajo la acción de una fuerza " constante " (campo gravitacional de la Tierra), más que por la calidad y eficiencia del servicio de comunicación, sin mencionar los servicios de comunicación móvil y menos aún los de comunicación personal.

---

<sup>1</sup> El ruido es la energía de cualquier señal indeseable que distorsiona la señal de información, las cuales una vez combinadas, difícilmente podrán separarse, limitando así la calidad del sistema. Por su parte, la temperatura de ruido de una fuente que genera ruido, es la temperatura a la que un elemento pasivo de referencia debería estar para generar la misma cantidad de ruido que la fuente mencionada.

<sup>2</sup> En frecuencias suficientemente bajas, la constante de tiempo de carga es bastante pequeña para completar la carga y descarga de una membrana durante un solo ciclo. Como resultado, el tejido posee una alta capacitancia celular (aproximadamente  $1 \mu F / cm^2$ ) y en consecuencia una alta constante dieléctrica, donde las membranas actúan como capas aislantes pues limitan el flujo de las corrientes al medio extracelular manteniendo al tejido con una baja conductividad.

Sin embargo, debido al contenido de agua del tejido, conforme incrementa la frecuencia se acentúa la polarización interfacial a través de las membranas celulares, lo cual aumenta la corriente en el medio intracelular y obviamente la conductividad total del tejido. Dicho incremento en la frecuencia también evita las paredes celulares cargandolas totalmente durante un ciclo completo, generando un decremento en la constante dieléctrica y en la reactancia capacitiva de las células.

No obstante que ya para frecuencias superiores a los 100 MHz la reactancia capacitiva de las membranas celulares es lo suficientemente baja como para asumir a las células como cortos circuitos, existe todavía un final decline en la constante dieléctrica y en el incremento de la conductividad del tejido en frecuencias superiores a 1 GHz debido a las propiedades polares de las moléculas de agua, las cuales tienen una frecuencia de relajación precisamente en la banda Ka, esto es alrededor de los 22 GHz.

De esta manera, podemos afirmar que la profundidad de penetración y la absorción o patrón calorífico por radiación inducido en los sistemas biológicos varía principalmente en base al contenido de agua en el tejido y a la frecuencia transmitida. Para tejidos de alto contenido de agua como los músculos, tejidos de la cabeza, órganos internos y la piel, la absorción es alta y la profundidad de penetración es baja; mientras que en aquellos tejidos de bajo contenido de agua como los huesos y tejidos grasos la magnitud de la absorción es baja y la profundidad de penetración es alta. Por otra parte, las reflexiones entre las interfaces de tejidos de alto y bajo contenido de agua pueden producirse severas ondas estacionarias acompañadas por puntos calientes en cualquiera de los tejidos, sin considerar la constante dieléctrica ni la conductividad del mismo.

## SISTEMAS GEOESTACIONARIOS DEL SIGLO XXI

### 4.1 INMARSAT

#### 4.1.1 Configuración espacial

Desde que el sistema Inmarsat inició operaciones en 1982, su segmento espacial ha evolucionado continuamente con la adquisición de satélites cada vez más potentes. De manera relevante, la integración de la segunda, y recientemente, de la tercera generación de satélites Inmarsat, ha permitido la creación de terminales móviles de mayor capacidad, calidad y portabilidad.

La generación Inmarsat-2, compuesta de 4 satélites de estabilización triaxial basados en la plataforma Matra/BAe Eurostar (Figura 4.1), fue construida por un consorcio internacional encabezado por British Aerospace en cooperación con Hughes Aircraft Company (USA), Fokker (Holanda), Matra (Francia), MBB (Alemania), NEC (Japón) y SPAR (Canada) <sup>1</sup>.

Diseñados para una vida útil de 10 años, cada uno de estos satélites provee una capacidad equivalente a 250 circuitos de voz respecto a una terminal Inmarsat A. Su carga útil la integran dos transpondedores, uno que sirve a los enlaces de banda C con las estaciones terrenas (6.4 GHz subida, 3.6 GHz bajada), y otro que mantiene los enlaces de banda L con las terminales móviles (1.6 GHz subida, 1.5 GHz bajada); ambos transmiten con un PIRE de 39 dBW en banda L.

---

<sup>1</sup> La construcción del segmento terrestre de control satelital, corrió a cargo de CLTC (China), CNES (Francia), SED (Canadá), Telespazio (Italia) e Intelsat.



**Figura 4.1** Los primeros satélites Inmarsat-2, fueron lanzados a bordo de vehículos Delta de McDonnell Douglas en octubre 30 de 1990 y en marzo 8 de 1991. Posteriormente, Inmarsat-2 F3 y F4 fueron puestos en órbita por lanzadores Ariane 4 en diciembre 16 de 1991 y en abril 15 de 1992, respectivamente. Debido al uso de inyección en órbita elíptica de transferencia, su masa inicial de 1300 Kg se redujo a 800 Kg una vez colocados en órbita. (Cortesía de INMARSAT.)

Integrada por satélites de mayor potencia, la serie satelital Inmarsat-3, fue creada a partir del mes de febrero de 1991<sup>1</sup> por Lockheed Martin Telecommunications (plataforma) y Matra Marconi Space (carga útil). Basados en la plataforma de la serie 4000 de Lockheed Martin (Figura 4.2), estos satélites generan una potencia de 2,800 W durante sus 13 o más años de vida útil, y proveen un  $\text{PIRE}$  superior a 48 dBW en banda L. Además, cuentan con tecnología para reuso de frecuencias y asignación dinámica de la potencia del transpondedor, que permite modificar los recursos entre un haz global y cinco haces puntuales, para superar en 8 y hasta 10 veces la capacidad de los satélites Inmarsat-2.

Adicionalmente, cada satélite Inmarsat-3 está equipado con un transpondedor para navegación, diseñado especialmente para mejorar la precisión y utilización de los sistemas satelitales de navegación GPS y Glonass (Figura 4.3)<sup>2</sup>, proporcionando, grosso modo, los siguientes servicios:

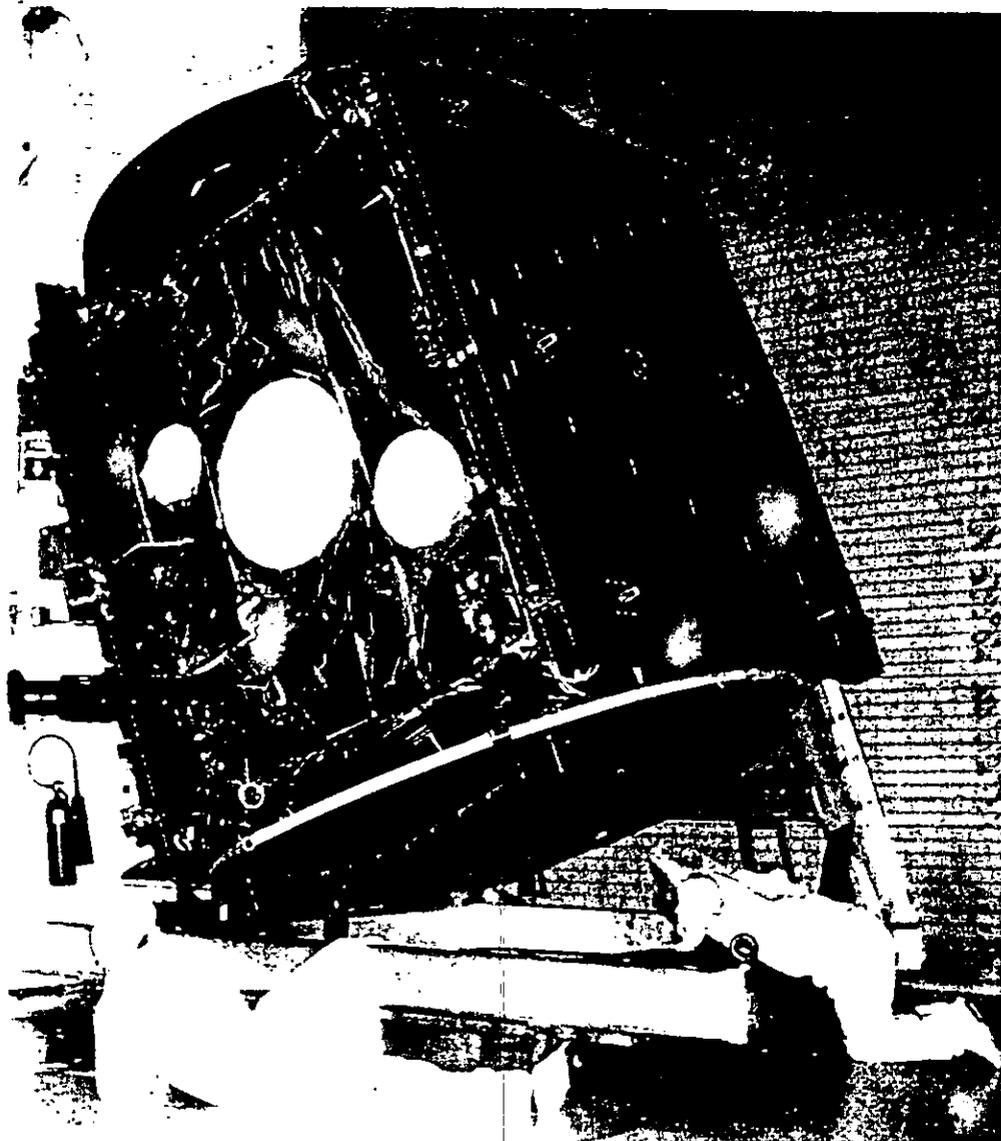
- Transmisión directa en tiempo real del estado actual de todos los satélites GPS/Glonass a los usuarios.
- Transmisión de señales codificadas de telemetría hacia las terminales móviles empleando señales similares pero diferentes a las de GPS.
- Transmisión de señales de sincronización que aumentan la eficiencia de los sistemas, principalmente de aquellos orientados para tráfico aéreo.
- Exactitud de 3-5 m en la posición de las terminales (99.99%), para distancias de 300-1000 Km entre el usuario y las estaciones de referencia.

El lanzamiento del primer satélite Inmarsat-3, se realizó en Cabo Cañaveral a bordo de un cohete Atlas IIA el 4 de abril 1996. Ese mismo año, fueron puestos en órbita, Inmarsat-3 F2 por un cohete Protón (lanzado desde Baikonur) el 6 de septiembre, e Inmarsat-3 F3 por un lanzador Atlas el 18 de diciembre. Posteriormente, a bordo de cohetes Arianspace fueron lanzados Inmarsat-3 F4 el 26 de julio de 1997 e Inmarsat-3 F5 el 27 de enero del presente año.

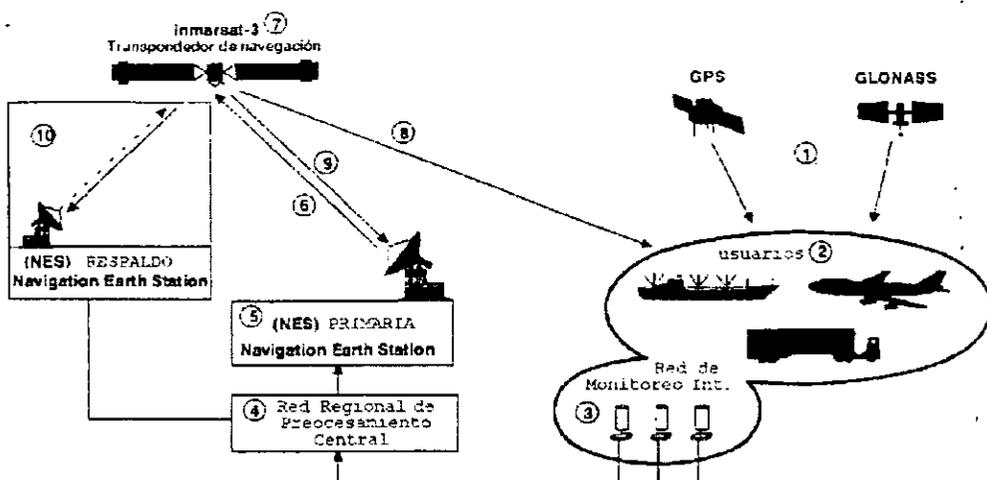
---

<sup>1</sup> Excepto el quinto y último satélite Inmarsat-3, solicitado en marzo de 1994.

<sup>2</sup> Como los satélites Glonass operan a diferente frecuencia, estos deberán difundir su información en una frecuencia GPS forzosamente (banda L).



**Figura 4.2** Técnicos en las instalaciones de Lockheed Martin realizan las inspecciones finales para el satélite Inmarsat-3 F1. (Cortesía de Lockheed Martin Telecommunications.)



**Figura 4.3** Las señales de navegación de los satélites GPS y Glonass (1) son recibidas por los receptores GPS de los usuarios (2), y por la Red de Monitoreo (3) operadas por agencias gubernamentales. Los datos detectados en ésta, son transmitidos a las Instalaciones de la Red Regional de Procesamiento Central (4), donde son procesados en forma de mensaje y enviados hacia las estaciones terrenas de navegación (NES) (5) y (10) (una de ellas, permanece encendida como respaldo), las cuales de manera sincronizada modulan en espectro disperso, la portadora del enlace de subida (6.4 GHz) (6) con la señal de navegación recibida. Posteriormente, el transpondedor de navegación del satélite Inmarsat-3 (7), retransmite la señal en banda L (1575.21 MHz) hacia los usuarios (8) y en banda C hacia las mismas estaciones terrenas (9), para que éstas a su vez, mantengan a la siguientes señales de navegación en sincronía con el enlace. (Cortesía de INMARSAT.)

Hasta mediados del año pasado, los satélites Inmarsat se encontraban colocados sobre las latitudes correspondientes a las cuatro principales regiones oceánicas del planeta, de la siguiente manera (Figuras 4.4 y 4.5):

**Región oceánica oeste del Atlántico**

*Funcional:* Inmarsat-2 F4 (54° O)

*Reserva:* Inmarsat-2 F2 (55° O)

**Región oceánica este del Atlántico**

*Funcional:* Inmarsat-3 F2 (15.5° O)

**Región oceánica del Indico**

*Funcional:* Inmarsat-3 F1 (64° E)

*Reserva:* Inmarsat-2 F3 (65° E)

**Región oceánica del Pacífico**

*Funcional:* Inmarsat-3 F3 (178° E)

*Reserva:* Inmarsat-2 F1 (179° E)

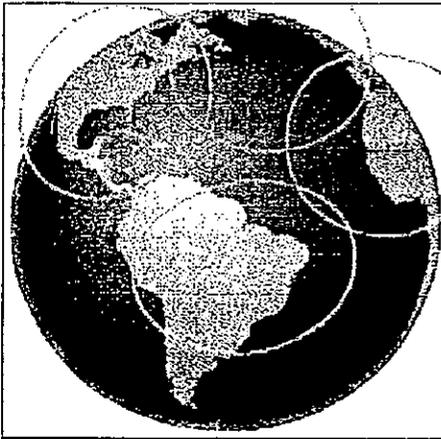
**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**



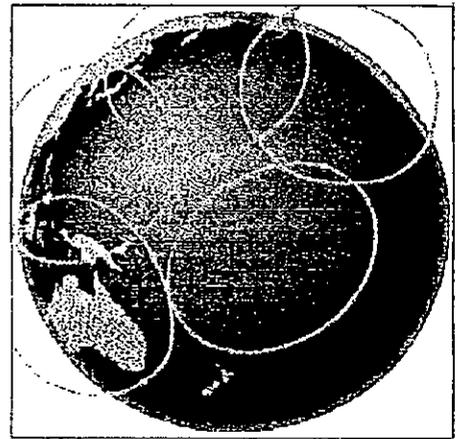
Región oceánica del Atlántico Este



Región oceánica del Indico

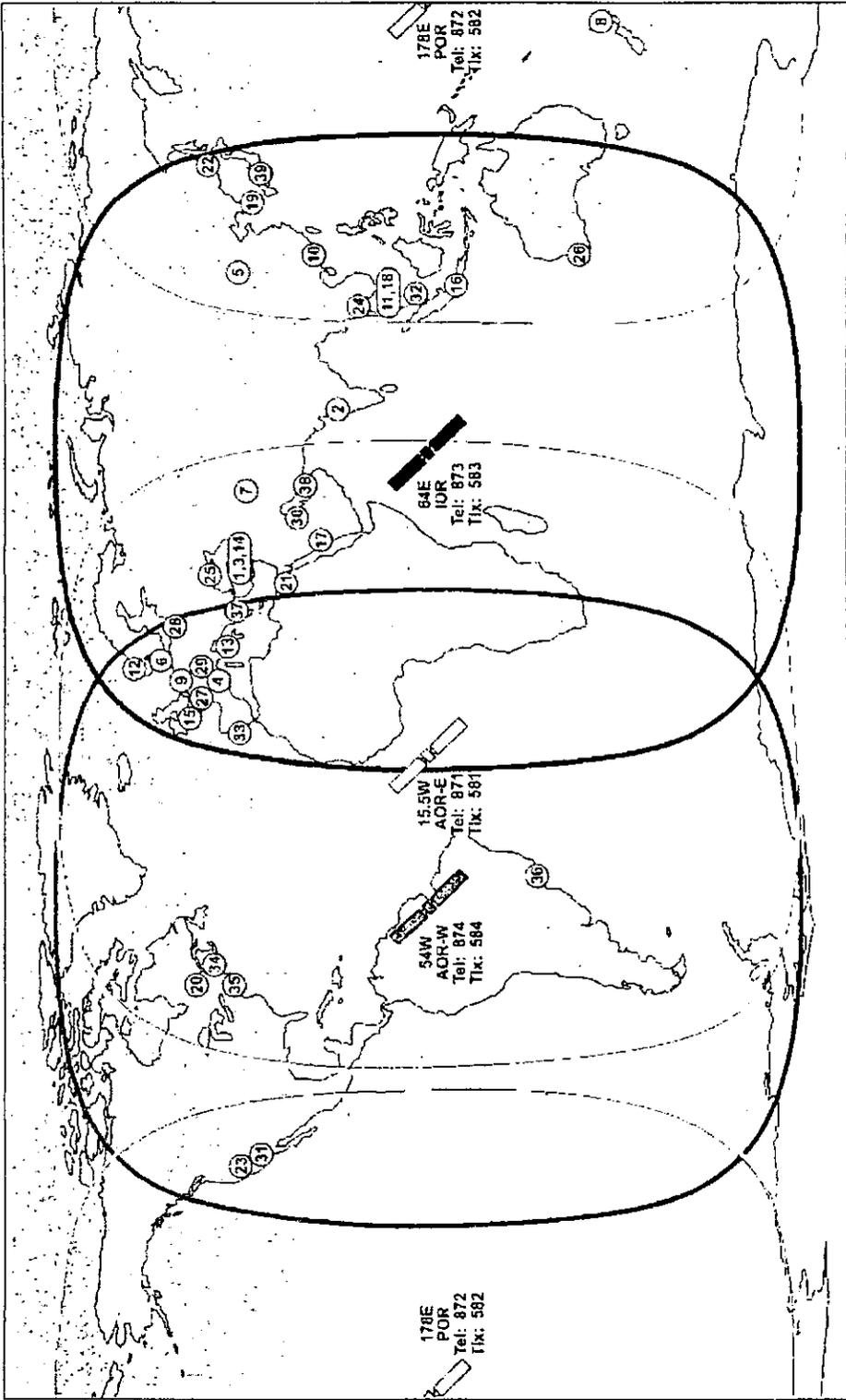


Región oceánica del Atlántico Oeste



Región oceánica del Pacífico

**Figura 4.4** Cobertura (parcialmente basada en predicciones por computadora) de los haces estrechos de los satélites Inmarsat-3. (Cortesía de INMARSAT.)



**Figura 4.5** Cobertura (parcialmente basada en predicciones por computadora) de los haces globales de los satélites Inmarsat-3 y posición de las estaciones terrenas actuales y futuras a corto plazo. (Cortesía de INMARSAT.)

## 4.1.2 Principales terminales Inmarsat

### 4.1.2.1 Inmarsat-A

Aunque dicho segmento espacial permite la interconexión con redes terrestres internacionales y redes satelitales de comunicación fija, su función principal es ser un enlace de comunicación para diversas terminales móviles: La primera de ellas, conocida como estándar A de Inmarsat, es una terminal analógica (tabla 4.1) que soporta telefonía de marcación directa, transmisiones de telex, fax, correo electrónico y datos a 9.6 Kbps (la transmisión de datos es a través de un módem que opera en la banda de voz, 300-3300 Hz). También existen versiones multicanal simplex y dúplex, para transmisión de datos a alta velocidad (64 Kbps, High Speed Data-HSD), ideales para transferencia de archivos de gran volumen, enlaces de audio de alta calidad (15 KHz) y transferencia de video por conmutación de mensajes (técnica de almacenamiento y envío).

**Tabla 4.1** Parámetros básicos de una terminal estándar A de Inmarsat.

Banda de transmisión	1636.5 - 1645.0 MHz
Banda de recepción	1535.0 - 1543.5 MHz
Capacidad de canales	339 con separación de 25 KHz
Figura de mérito (G/T)	- 4 dB/K
PIRE (nominal)	36 dBW
Antena	Reflector parabólico de 90 cm de diámetro. Ganancia de 21 dB y 15° BWHP* en banda L
Estabilización	Giro-estabilizada / 4 ejes
Entorno	-35 a +55° C 95% de humedad velocidades de viento de 100 nudos <sup>1</sup> vibraciones 10-15 Hz, con amplitudes pico de 0.76 mm
Método de comunicación	NBFM* con compresión
Telex	Tx: 1 canal de 4.8 Kbps BPSK (TDMA*) Rx: 1.2 Kbps BPSK (flujo TDM*)
Datos	NBFM sin compresión
Solicitud de canal vía	2 canales de acceso aleatorio (Aloha puro)

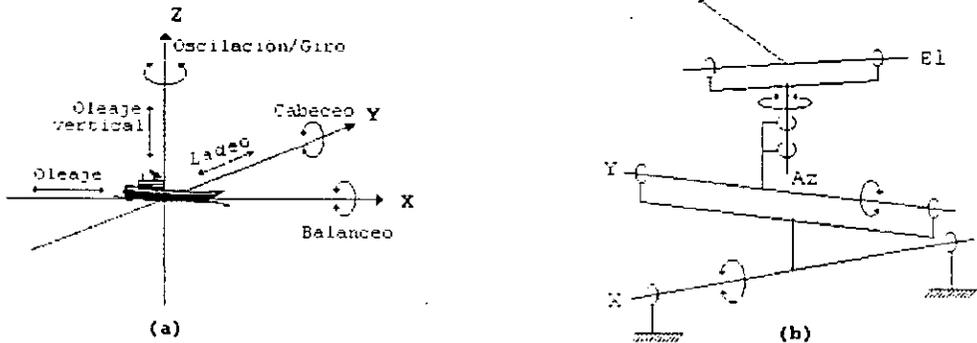
<sup>1</sup> Velocidad de navegación equivalente a 1. 852 m por hora.

\* Consúltese el glosario

En las versiones marítimas de este estándar (Figura 4.8), la antena está instalada en lo alto de la estructura del barco (dentro de un domo), sobre una plataforma estabilizada giroscópicamente, que montada en un sistema de 4 ejes independientes permite una mayor exactitud en el apuntamiento hacia el satélite, aún bajo las condiciones de movimiento señaladas en la tabla 4.2. Por sencillez y bajo costo, en el seguimiento del satélite se emplea comúnmente la técnica de rastreo por pasos<sup>1</sup>, con periodos de aproximadamente 30 segundos.

**Tabla 4.2** Parámetros de movimiento soportados por una terminal marítima, estándar A de Inmarsat.

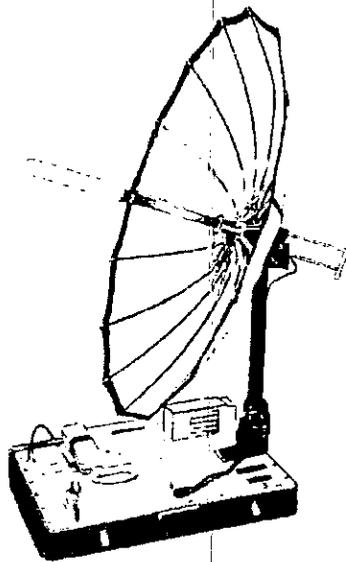
Balanceo (alrededor del eje long.)	$\pm 30^\circ$ por 8 seg.
Cabeceo (inclinación longitudinal)	$\pm 10^\circ$ por 6 seg.
Oscilación (nivel vertical)	$\pm 80^\circ$ por 50 seg.
Oleaje (golpe de ariete)	$\pm 0.2$ g
Ladeo (vaivén longitudinal)	$\pm 0.2$ g
Oleaje vertical	$\pm 0.5$ g
Velocidad de giro	6 grados / seg.
Velocidad	30 nudos



**Figura 4.6** a) Componentes de movimiento de un barco. b) Montaje de 4 ejes.

<sup>1</sup> A intervalos regulares, la antena monitorea la intensidad de la señal guía del satélite y la compara con la intensidad de la señal registrada anteriormente, si el nivel baja, la antena se mueve en dirección opuesta y si el nivel aumenta, entonces continua dando pasos en la misma dirección hasta detectar el nivel máximo.

Por su parte, las terminales portátiles de dicho estándar emplean una antena paraboidal plegable tipo sombrilla, también de 0.90 m de diámetro, que puede ser orientada manualmente hacia el satélite, como se muestra en la figura 4.7. El peso de esta versión es de aproximadamente 30 Kg y generalmente requiere una instalación de casi 5 minutos, debido a que es transportada en uno o en dos contenedores de tamaño adecuado.



**Figura 4.7** Terminal portátil del estándar A de Inmarsat. La antena amplifica entre 20 y 40 dB (según su tamaño) la potencia de la señal a transmitir, y para amplificar las señales recibidas, la terminal posee un LNA con  $G/T \sim 1$  a 2 dB. Además, cuentan con un sistema basado en microprocesadores que incluye las funciones de control (selección de frecuencia Tx/Rx, decodificador e interface con los dispositivos periféricos). (Cortesía de MTI Corporation.)

#### 4.1.2.2 Inmarsat-B

De manera gradual, el estándar A está siendo sustituido por terminales digitales más sencillas y de menor potencia, denominadas Inmarsat-B. (Figura 4.8) Dichas terminales emplean antenas similares al estándar A, pero el PIRE requerido en ellas es 3 dB menor, debido a la ligera concentración de potencia a causa de la definición del contorno del haz global, generado por las antenas de los satélites Inmarsat-2. Además, la tecnología digital de las mismas, hace posible integrar nuevas facilidades al rango de servicios preestablecidos por el estándar A, como son:

- Mejor calidad en telefonía (modulación digital y procesamiento de voz).
- Incremento a más de 9.6 Kbps, en la tasa de los servicios de datos de baja velocidad (telex, teletex y facsímil).
- Servicios de datos a una velocidad superior a 16 Kbps

**Tabla 4.2** Parámetros de diseño de una terminal B de Inmarsat.

Velocidad de transmisión	32 Kbps
Velocidad de bits por canal	16 Kbps
Modulación	4 PSK *
G/T	-4 dB/K
Ganancia de la antena	21 dBi
Codificación	Codificación predictiva adaptable <sup>1</sup>
FEC *	Convolutacional <sup>2</sup> tasa 1/2
Decodificación	Viterbi de decisión flexible (suave) <sup>3</sup>
Modo telefónico	Activado por voz

<sup>1</sup> Esta consiste en extrapolar algunos valores anteriores para predecir el valor siguiente y, después codificar la diferencia entre la señal real y la pronosticada <sup>4</sup>.

<sup>2</sup> En los códigos convolutacionales, la información de verificación de paridad está distribuida sobre un espacio de símbolos de mensaje (llamada espacio acotado), lo cual permite codificar continuamente largas corrientes de bits sin necesidad de agruparlos en bloque, a través del uso de registros de corrimiento (serie de memorias binarias en cascada), cuyas salidas se combinan de una manera preestablecida para fijar los límites en la corriente de bits codificada <sup>4</sup>.

<sup>3</sup> El algoritmo viterbi considera una medida de similaridad o distancia, entre la señal recibida en el tiempo  $t_i$  y todas las trayectorias de entrada, eliminando aquellas que no sean candidatas posibles para el máximo umbral seleccionado. La codificación de más de dos niveles de cuantización es llamada codificación suave <sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Consúltese: Sklar B., Digital Communications, Prentice Hall, 1988.

\* Consúltese el glosario



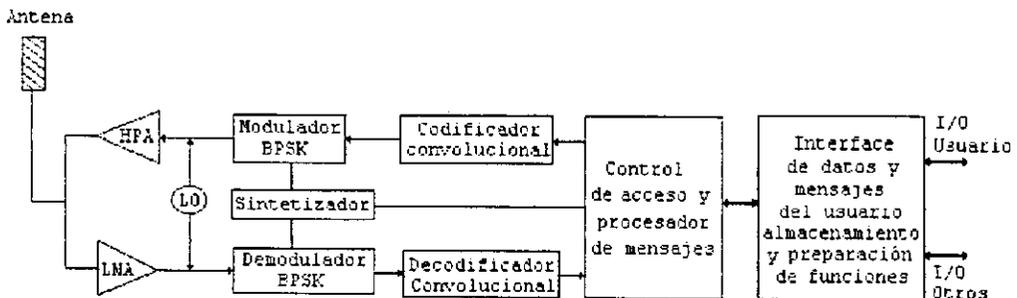
Figura 4.18 Terminales Inmarsat A, B y C. (Cortesía de INMARSAT.)

### 4.1.2.3 Inmarsat-C

Al emplear antenas omnidireccionales de menor G/T, el estándar C de Inmarsat (Figura 4.8), transmite a una velocidad muy baja, pero evita el uso de sistemas de rastreo, minimiza su tamaño, costo y el PIRE de la estación terrena. Opcionalmente, su sistema (tabla 4.3 y Figura 4.9) opera por conmutación de mensajes (los mensajes completos son formateados previamente a su transmisión) o por conmutación de circuitos (conexión permanente y/o semipermanente durante el tiempo de llamada), soportando la transmisión bidireccional de mensajes, telex, fax y correo electrónico; además, adicionalmente incluye servicio de código para operaciones especiales, circuitos full dúplex, sistema de línea compartida por interrogación (polling), reporte de datos y recepción de llamadas de grupo.

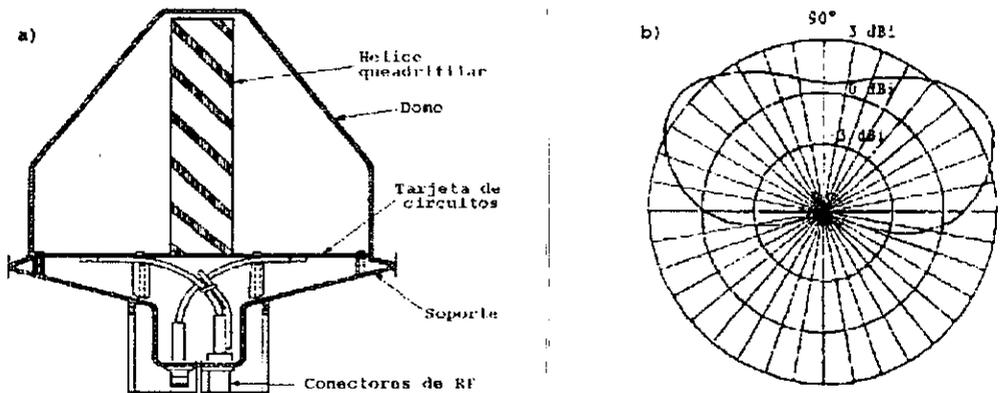
**Tabla 4.3** Parámetros de diseño de una terminal C de Inmarsat.

PIRE	12 - 16 dBW
G/T	- 22.8 dB/K
Ganancia de la antena	21 dBi
Modulación	BPSK
Velocidad de transmisión	600 y/o 1200 bps
C/N	36 dB/Hz
BER	$10^{-3}$
Codificación	Viterbi tasa 1/2
Interleaver	Seleccionable



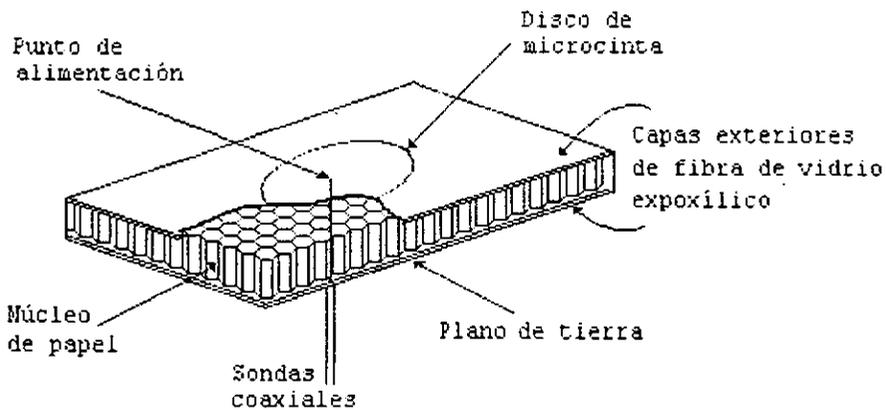
**Figura 4.9** Diagrama de bloques de una terminal estándar C de Inmarsat. Indistintamente, algunas versiones incluyen al amplificador de alta potencia, al amplificador de bajo ruido y al convertidor de frecuencias en la unidad de la antena.

El tipo de antenas omnidireccionales ideales para éste estándar son antenas de microcinta, dipolos cruzados inclinados y antenas helicoidales cuadrifilares. Esta última está compuesta de 4 bobinas en hélice idénticas, igualmente separadas sobre la superficie de un cilindro (Figura 4.10), donde las hélices son alimentadas con señales de igual amplitud, pero desfasadas  $0$ ,  $90$ ,  $180$  y  $270^\circ$  respectivamente, proporcionando excelentes características de polarización circular respecto a un amplio rango de frecuencias.



**Figura 4.10** Sus parámetros dependen notablemente del diámetro del cilindro y del ángulo de inclinación de las hélices. Sus características generales (3 dBi de ganancia mínima, 3 dB de máxima razón axial y 40 cm de altura promedio), la hacen ideal para terminales marítimas. a) Esquema de la antena. b) Patrón de radiación de la antena para las frecuencias de recepción. (K. Fujimoto, "Mobile Antenna Systems Handbook", Artech House, 1994; y T. Higuchi, "Experiment of Inmarsat Standar-C System", Fourth International Conference on Satellite Systems for Mobile Communications and Navigation, IEE & Inmarsat, octubre 1989.)

Dicho estándar presenta versiones portátiles que pueden ser conectadas a una PC para facilitar el intercambio de mensajes (véase la Figura 2.8). Las mismas, contienen un banco de baterías secas, que comúnmente, les permite transmitir por 30 minutos y recibir durante aproximadamente 60 minutos. Para el año en curso se espera en el mercado la introducción de una nueva versión de este estándar, ésta de menor tamaño (similar al de una laptop), costo y sencillez de operación, conocida como Inmarsat C3, aprovechará la potencia de los satélites Inmarsat-3.



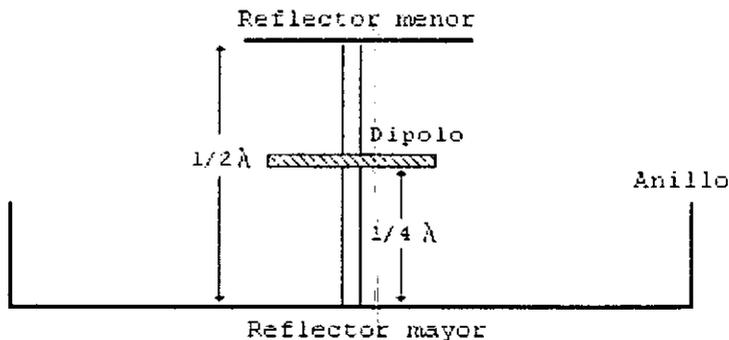
**Figura 4.11** Las terminales portátiles Inmarsat C típicamente emplean antenas de disco circular de microcinta, mostrado en la figura, en arreglos de 4 elementos. Las dimensiones de arreglo son comúnmente de 3.8 Kg. 34(A) cm x 21(L) cm x 6(h) cm. (Cortesía de Toshiba.)

#### 4.1.2.4 Inmarsat-M

El sistema digital Inmarsat phone, mejor conocido como Inmarsat-M, fue diseñado para soportar telefonía digital a 2.4 Kbps, fax, y datos, en una terminal más ligera, económica y de uso fácil.

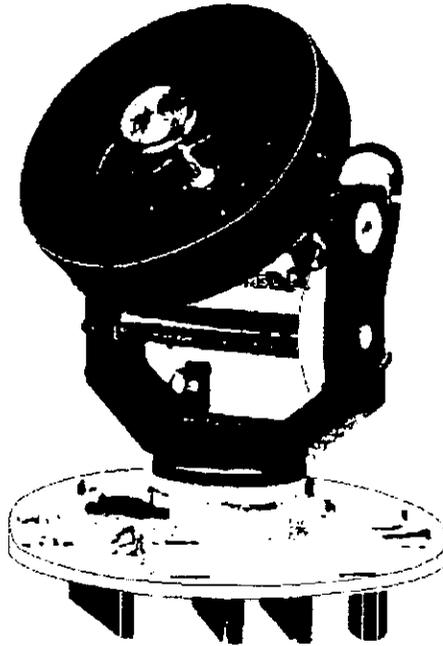
Descartando el uso de pequeñas antenas de reflector parabólico, debido a su baja eficiencia, las terminales marítimas de éste estándar pueden emplear antenas cortas backfire (Short Backfire Antenna - SBF) convencionales y modificadas, además de arreglos de antenas helicoidales y de microcinta.

La antena corta backfire convencional (Figura 4.12), está compuesta básicamente de dos reflectores planos circulares de diferente diámetro separados generalmente por  $\frac{1}{2} \lambda$  (éstos forman una cavidad resonante de muy baja fuga), un anillo metálico alrededor del reflector mayor y un dipolo atravesado en el punto medio entre los dos reflectores ( $\frac{1}{4} \lambda$ ) que genera la polarización circular.



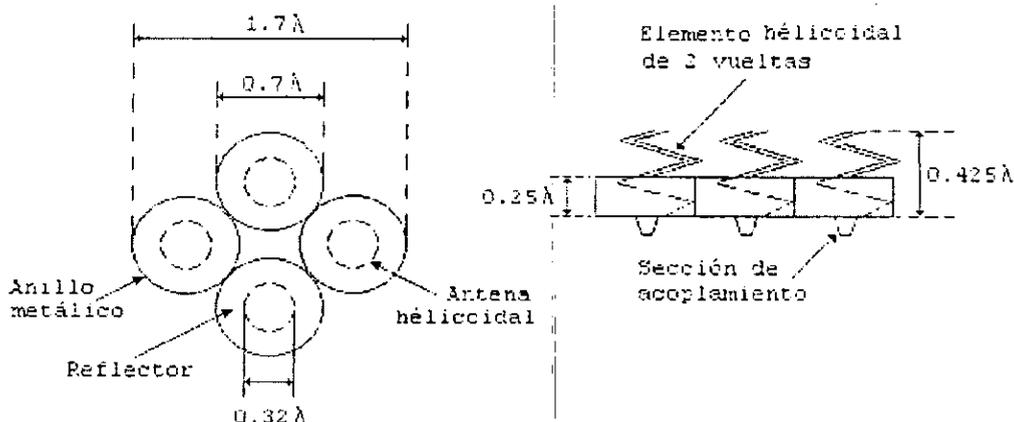
**Figura 4.12** Antena corta backfire convencional. Experimentalmente se ha demostrado [K. Fujimoto, "Mobile Antenna Systems Handbook", Artech House, 1994] que: el HPBW de la antena está inversamente relacionado con el diámetro del reflector menor; la altura del anillo metálico determina el nivel de los lóbulos laterales de la antena (para alturas mayores a  $0.2\lambda$  el nivel de los lóbulos laterales disminuye hasta 20 dB); la máxima ganancia de la antena (15 dBi) es viable cuando el diámetro del reflector menor varía de  $0.5\lambda$  a  $0.7\lambda$  y el diámetro del reflector mayor es de  $2.24\lambda$ ; y finalmente, que la separación entre los reflectores, la altura del anillo y del dipolo son relativamente despreciables respecto a la ganancia de la misma.

Las antenas cortas backfire modificadas, tienen una mayor ganancia y amplían las características de impedancia de entrada (relación de onda estacionaria) a un mayor rango de frecuencias (necesario para cubrir el rango de operación de la terminal 1.6/1.5 GHz). Básicamente, éstas presentan un reflector cónico como reflector mayor, o bien, un escalón adicional en el reflector mayor (Figura 4.13).

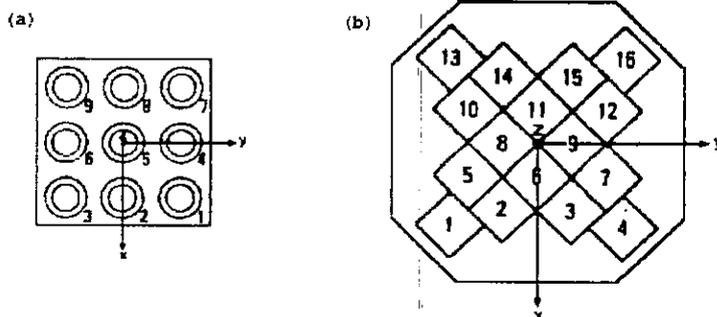


**Figura 4.13** Antena BSF modificada, montada sobre un sistema de dos ejes (E/Az) e integrada a un sistema de rastreo y apuntamiento. Experimentalmente [K. Fujimoto, "Mobile Antenna Systems Handbook", Artech House, 1994] se ha comprobado que para frecuencias  $\sim 1.5$  GHz, un escalón de 15 a 20 mm de alto y 270 mm de ancho, proporciona casi 1 dB en la ganancia y 0.3 dB en la relación axial de la antena respecto a una SBF convencional; y que la relación de onda estacionaria (VSWR- Voltage Standing Wave Ratio, determinada por la separación entre los reflectores pequeños) puede reducirse a menos de 1.2 en ambas frecuencias (convencionalmente de 1.7 para 1.54 GHz y 1.5 para 1.64 GHz.)

Por otra parte, los arreglos de antenas, empleados por Inmarsat phone, se muestran en las figuras 4.14 y 4.15.



**Figura 4.14** Arreglo de cuatro antenas helicoidales con anillo. Este posee una ganancia de 13 dBi (HPBW: 38 grados), una relación axial de 1.0 dB y una eficiencia de apertura de casi el 100%. (K. Fujimoto, "Mobile Antenna Systems Handbook", Artech House, 1994.)



**Figura 4.15** Arreglos de antenas para obtener un patrón de radiación similar en planos cruzados. a) Arreglo cuadrado de antenas de microcinta formado por 9 elementos (3x3), separados 94 mm (casi  $\frac{1}{2}\lambda$  de 1.6/1.5 GHz) entre si y con un volumen total de 300 x 300 x 10 mm. b) Arreglo cuadrado de ranuras transversales, integrado por 16 elementos (4x4), separados 97 mm entre si y con un volumen total de 560 x 560 x 20 mm. En ambos arreglos, el haz de exploración está diseñado para controlar los desplazadores de fase variable de 4 bits acoplados a cada elemento de la antena (K. Fujimoto, "Mobile Antenna Systems Handbook", Artech House, 1994).

La última versión de éste estándar, conocida como Inmarsat mini-M, hace uso de los haces puntuales de los satélites Inmarsat-3 (Figura 4.16), utiliza arreglos de antenas de microcinta, opera con un banco de baterías recargables al 100% (inclusive a través del encendedor de un auto), es del tamaño de una laptop y pesa aproximadamente 2 Kg con batería incluida. Los servicios que ofrece son: telefonía digital a 4.8 Kbps, transmisión de fax grupo III, e-mail y datos a 2.4 Kbps con interfaces de seguridad STU III, llamada en proceso, llamada en espera, remarcación de la última llamada, agenda telefónica y acceso a internet (Tabla 4.4 y Figuras 4.16 y 4.17).

Además de que en dichas versiones, el soporte del microteléfono puede separarse de la unidad principal, permitiendo una mayor libertad, ésta contiene un módulo identificador de abonado que opera a través de tarjeta SIM que puede ser instalada y retirada para:

- compartir un mismo número de usuario evitando un complicado acuerdo de cuentas (pues dan un desglose de llamadas por usuario)
- evitar que cualquier persona que use la terminal conozca la identidad y el estado de cuenta del cliente, pues dicha información es codificada.
- rápida cancelación de la tarjeta en caso de pérdida o robo, siendo reemplazada sin necesidad de complicadas reprogramaciones en la terminal.

**Tabla 4.4** Especificaciones de la terminal Mini-M de Nera. (Cortesía de NERA Telecommunications).

Unidad completa	57 x 260 x 260 mm
Teléfono	44 x 235 x 190 mm
Peso	2.4 Kg
Temperatura	antena: -35° C a +55°C teléfono: -25°C a + 55°C registro: -50°C a +80°C
Batería	NiMh, recargable
Req. de potencia	receptor: 9.5 W transmisor: 12 W
Interfaces	<i>Entrada para ext. tel./fax:</i> 2 x RJ11 (supresión de eco y marcación por tonos) Datos: D-SUB, 9 pines, RS232 <i>Potencia:</i> conector DC w/2 mm pin central, 10-32 VDC
Pantalla	LCD de 64x240 puntos (8x40 caracteres), multilingüe
T.de op.continua (batería)	3 hr de comunicación, 50 hr en alerta

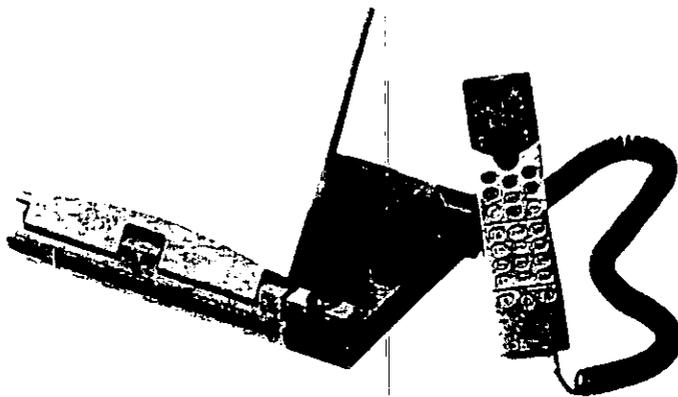
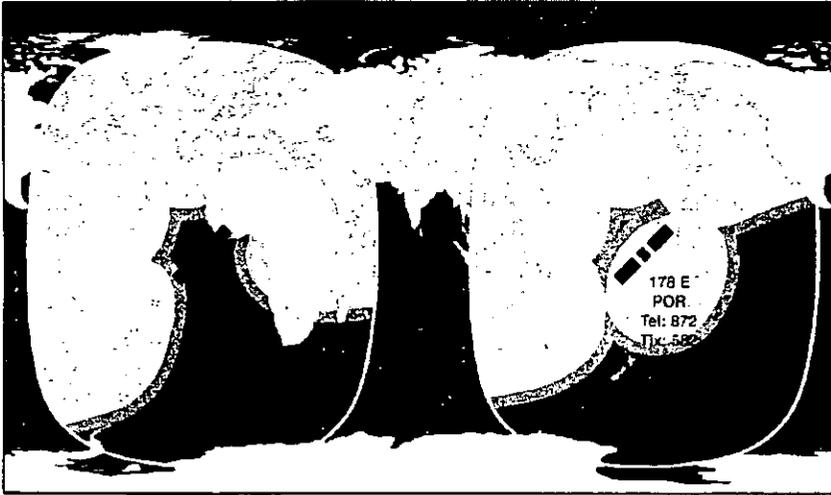


Figura 4.17 Terminal Mini-M construida por NERA y terminal Mini-M fabricada por NEC. Base (4.2 x 24.3 x 21 cm), microteléfono (4.2 x 4.3 x 21 cm), temperatura en operación (-25 a +50 °C AC, 0 a +40 °C con su batería de litio) y tiempo de operación con batería (1.5 hrs activo, 5 hr en alerta). (Cortesía de INMARSAT e IEEE Spectrum, diciembre 1996, respectivamente.)

Región oceánica este del Atlántico

Región oceánica del Pacífico



Arca primaria

Arca extendida

Región oceánica del Índico

Región oceánica oeste del Atlántico



**Figura 4.17** Cobertura integral de los haces puntuales de los satélites Inmarsat-3, para las terminales Inmarsat mini-M. Estos generalmente están enfocados hacia las masas terrestres, debido a que es ahí donde dichas terminales son empleadas principalmente. También se señalan los contornos de los haces globales de los satélites. (Cortesía de INMARSAT.)

#### 4.1.2.5 Inmarsat-Aero

El estrecho ancho de banda para el servicio aeronáutico y la suma de cuantiosos bits en la transmisión a causa de las complejas técnicas de codificación necesarias debido a las alteraciones del efecto Doppler y la atenuación por el efecto de multitrayectoria, obligan a las terminales Inmarsat-Aero, operar a tasas de información bastante bajas.

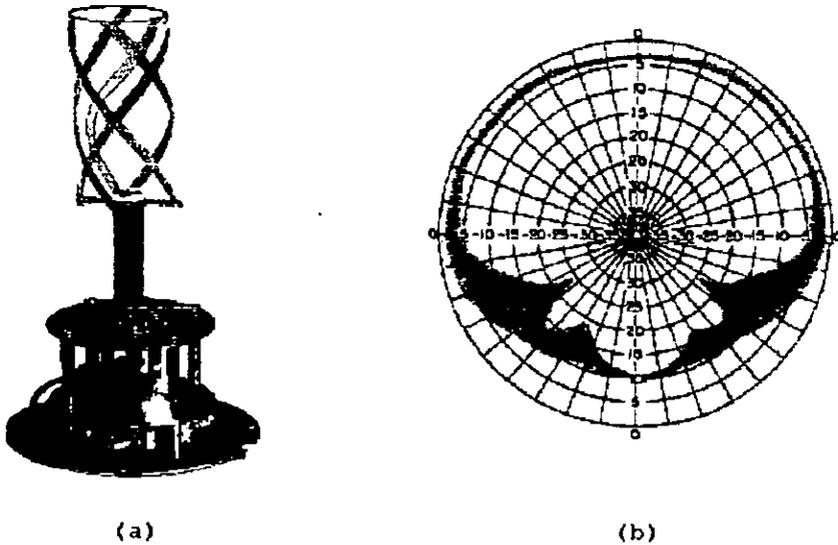
La transmisión sobre el canal de datos es de 600 bps<sup>1</sup>, pero como se emplea un FEC con tasa de 1/2, la tasa de información efectiva disminuye a 300 bps. De manera análoga, en el canal de voz, las señales son digitalizadas a 9.6 Kbps y combinadas con datos de señalización, resultando una tasa de 10.5 Kbps, que se duplica al emplear el FEC, generando una tasa de transmisión de 21 Kbps.

Actualmente, existen tres versiones de este estándar (Tabla 4.5). El estándar Aero C, es un sistema de baja transmisión de datos que permite almacenar y enviar texto o mensajes de datos (excluye comunicaciones de seguridad de vuelo). El estándar Aero L, también de baja velocidad (600 bps) ofrece comunicación en tiempo real, y el estándar Aero H, provee servicios de alta velocidad (10.5 Kbps) para comunicaciones multicanal de voz, fax y datos.

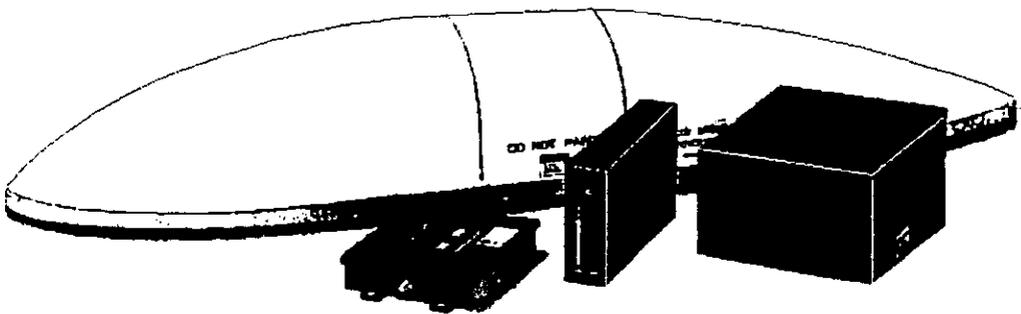
Inmarsat Aero C y L, emplean antenas omnidireccionales convencionales, como la antena helicoidal cuadrifilar (Figura 4.18)<sup>2</sup>, debido a que requiere antenas que presenten una G/T de -26 dB/K (ganancia ~ 0 dBi). Por su parte, Aero H requiere antenas de alta ganancia (G/T ~ -13 dB/K, ganancia ~ 12 dBi) como las antenas de elementos en fase, que idealmente, son montadas en lo alto del fuselaje (Figura 4.19), para mantener las características de radiación en casi todas direcciones, a pesar que dicha área presenta mayor resistencia al aire que la experimentada en los costados.

<sup>1</sup> En base a las facilidades de la estación terrena, éstas pueden operar a tasas de 1200 y 2400 bps)

<sup>2</sup> También es posible el uso de antenas de dipolos cruzados transversales y de antenas de parches de microcinta.



**Figura 4.18** a) Antena helicoidal de media vuelta. b) Patrón de radiación de la misma antena para una frecuencia de 1,537.5 MHz (K. Fujimoto, "Mobile Antenna Systems Handbook", Artech House, 1994).



**Figura 4.19** Antena de elementos en fase para Inmarsat Aero H. (Cortesía de Toyocom.)

Tabla 4.5 Especificaciones de Inmarsat-Aero.

Parámetro	Aero C y L	Aero H
Tasa de información	300 bps	9600 bps
Velocidad de transmisión	600 bps	21000 bps
Modulación	BPSK simétrico	BPSK desplazado
Separación entre portadoras	2.5 KHz	17.5 KHz
G/T	-26 dB/K	-13 dB/K
FEC	½ Viterbi (k = 7)	½ Viterbi (k = 7)
Codificación de voz		APC/MLQ
Retardo por inserción de bits	640 ms	18.3 ms
BER* para voz		10 <sup>-5</sup>
BER para datos	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>
C/No ( sin atenuación)	30.1 dB/Hz	44.2 dB/Hz
C/No (al transmitir)	35.7 dB/Hz	48.6 dB/Hz
C/No (al recibir)	35.1 dB/Hz	47.0 dB/Hz

Actualmente , está siendo desarrollado Inmarsat-Aero I, una terminal más pequeña y sencilla que el estándar Aero H, pero de mayor capacidad, diseñada para aprovechar la potencia de los satélites Inmarsat-3; se espera su implantación en el presente año.

Simultáneamente, se encuentran en actual discusión las características de una nueva terminal Inmarsat-B, basada en la combinación de módulos de las terminales B y Mini-M, que dispondrá íntegramente de uno de los haces puntuales de Inmarsat-3, logrando disminuir su peso ( 5-8 Kg), tamaño, potencia (antenas de 15-17 dBi), y mejorar los servicios ofrecidos por sus predecesoras versiones.

A continuación, la tabla 4.6 presenta un resumen de los costos, tarifas y terminales atendidas por el sistema Inmarsat.

**Tabla 4.6** Datos generales de las diferentes terminales del sistema Inmarsat.  
(Cortesía de INMARSAT.)

<b>→ Costos de la terminal (dólares):</b>
<i>Inmarsat-A</i> : \$25,000-35,000 (+\$10,000 para la opción HSD)
<i>Inmarsat-B</i> : \$25,000-35,000 (+\$5,000 para la opción HSD)
<i>Inmarsat-C</i> : \$5,000-8,000
<i>Inmarsat-phone M</i> : \$10,000-12,000
<i>Inmarsat-phone mini-M</i> : \$3,000-5,000
<i>Inmarsat Aero-H</i> : \$150,000-200,000
<i>Inmarsat Aero-C</i> : \$25,000
<b>→ Tarifas de servicio (dólares):</b>
<i>Inmarsat-A</i> Teléfono, Fax y Datos: \$3-8/minuto Telex: \$2-4/minuto
<i>Inmarsat-B</i> Teléfono, Fax y Datos: \$2-6/minuto Telex: \$2-4/minuto
<i>Inmarsat-C</i> Telex y Datos: \$1-1.5/Kbit
<i>Inmarsat-phone M</i> Teléfono, Fax y Datos: \$2-6/minuto
<i>Inmarsat-phone mini-M</i> Teléfono, Fax y Datos: \$3/minuto
<i>Inmarsat-Aero</i> Teléfono: \$5-8/minuto Fax: \$8/página Datos: \$0.7-0.9/Kbit (Aero-C y L) \$0.45/Kbit (Aero-H)
<b>→ No. aproximado de terminales instaladas</b>
<i>Inmarsat-A</i> : 25,000
<i>Inmarsat-B</i> : 3,500
<i>Inmarsat-C</i> : 30,000
<i>Inmarsat-phone</i> : 14,000
<i>Inmarsat-Aero</i> : 1,100

## 4.2 MSAT

### 4.2.1 Configuración espacial

El sistema MSAT (propuesto inicialmente en Canadá), es el resultado de la integración de estudios hechos por la NASA (National Aeronautics and Space Administration) en la década de los 80's y continuados por los laboratorios JPL (Jet Propulsion Laboratory) de California; con el propósito de crear un sistema satelital de comunicaciones móviles comerciales (MSAT-X), que proveyera cobertura al área continental de los Estados Unidos (CONUS - Continental United States). Dicho sistema, planeado para operar en la banda de los 860 MHz; tuvo que cambiar sus frecuencias de operación a la banda L para comunicación con las terminales móviles y a la banda Ku para enlaces con la red terrestre de control, debido a las asignaciones realizadas en 1987 por la WARC\*. Ese mismo año, la FCC\* concedió a AMSC<sup>1</sup> la distribución de los servicios de voz, datos, fax y servicios relacionados, hacia los Estados Unidos y sus territorios cercanos, a través del sistema MSAT.

Inicialmente, este sistema sugería el uso del rango de 1540-1559 MHz para los enlaces de bajada y el rango de 1646.5-1660.5 MHz para los enlaces de subida, así como una estación central de control con una antena de reflector de escasos 4 m. Sin embargo, la estación central ha cambiado, pues ésta emplean una antena de reflector parabólico de 11 m; de igual manera, también a cambiado el rango de frecuencias, pues paralelamente al desarrollo de dicho sistema, TMI (Telesat Mobile, Inc.) en Canadá, planeó el lanzamiento de un satélite MSAT, modificando así el espectro dispuesto para el servicio.

<sup>1</sup> AMSC (American Mobile Satellite Corporation), es un consorcio internacional complicado, pero el 90 % de éste, es propiedad de cinco grandes compañías: McCaw Cellular Communications (ahora con AT&T), Hughes Communications, Inc. (ahora encabezada por General Motors), Mtel Corporation, Singapore Telecom, e inversionistas públicos.

\* Consúltese el glosario.

Cabe mencionar que en abril de 1993, debido al retiro repentino de \$213 millones de dólares, los funcionarios de TMI tuvieron que declararse en bancarota para protegerse de sus acreedores. Hecho que aprovechó la AMSC (autorizado para lanzar 3 satélites geoestacionarios) al solicitar a la FCC, el lanzamiento futuro de una constelación de ocho satélites MSAT en las posiciones de 62°, 101°, 106.5° y 139° Oeste (2 satélites en cada ranura orbital), de los cuales 6 serían propiedad y operados por la organización y los dos restantes por TMI. Sin embargo, Bell Canadá (BCE), compró TMI y proporcionó los fondos suficientes para lanzar la versión canadiense de MSAT al espacio.

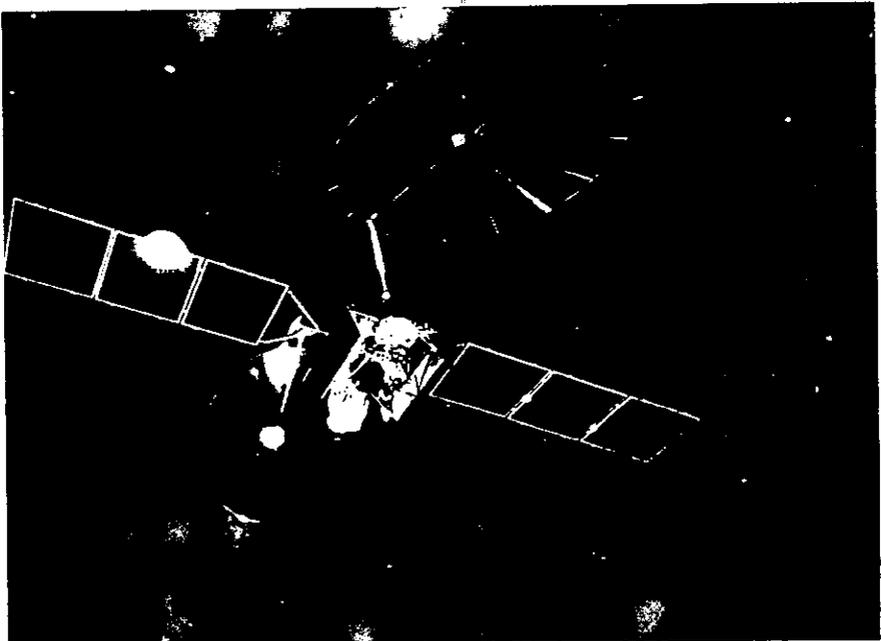
De esta manera, actualmente el sistema MSAT consta de dos satélites geoestacionarios de estabilización triaxial de igual diseño; uno americano, construido por Hughes Aircraft Co., y otro canadiense, construido por Spar Aerospace Ltd. Ambos de 70 m de largo y 2,858 Kg, fueron lanzados a finales de 1994 por General Dynamics desde San Diego, California, a bordo de cohetes Atlas IIA, empleando el procedimiento de inyección en órbita elíptica de transferencia, éstos quedaron colocados con una masa inicial de 1,542 Kg, en las posiciones de 101° O (sur de Houston, Texas y Topeka, Kansas) y 106.5° O (sur de Denver, Colorado y Moosejaw, Saskatchewan), respectivamente.

Dichos satélites emplean el rango de 1525-1559 y de 1626.5-1660.5 MHz para transmitir y recibir, respectivamente, los canales de radio (de 5 KHz cada uno, los cuales emplean como esquema de reducción la técnica de codificación lineal predictiva LPC) de las terminales móviles, así como la banda Ku para los enlaces con la estación central de control.

Cada uno de los satélites fue diseñado para operar 3200 canales de radio durante un tiempo útil de 10 a 12 años. Estos se caracterizan por ser hasta la fecha, los satélites de comunicación móvil más potentes para uso comercial. Ambos cuentan con una capacidad eléctrica de 3000 W en total, generada por los enormes arreglos solares de silicio, montados en ambos lados del satélite. La mayor parte de dicha energía es empleada por los subsistemas a bordo<sup>1</sup> y el resto es almacenada en una batería única de níquel-hidrógeno (123 amperes/hora), que es utilizada cuando el satélite está en la sombra de la Tierra, o bien, durante los intervalos de mayor demanda.

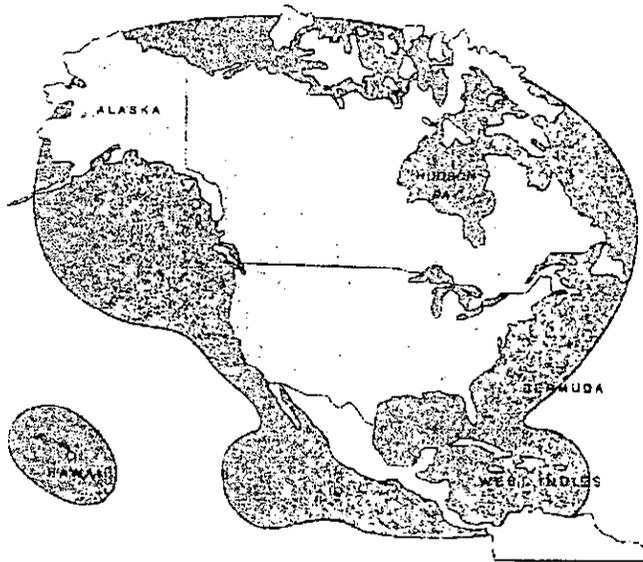
<sup>1</sup> Tal es el caso de los 8 FETs que emplean parte de la energía del satélite para proporcionar individualmente, una potencia de salida de 31.8 W en cada uno de los 2 amplificadores de banda L (FET -Field-Effect Transistor, es un transistor en el cual, la amplitud de la señal de salida es gobernada por un campo eléctrico que es a su vez modulado por la señal de entrada).

La siguiente figura muestra al satélite canadiense MSAT, que al igual que el satélite americano, está equipado con una pequeña antena de 76 cm que opera con polarización lineal en la banda Ku para los enlaces con la estación central de control, y dos grandes antenas ensambladas, para la banda L, las cuales fueron diseñadas para desplegarse en el espacio antes de iniciar la operación del servicio. Estas dos antenas, idénticas, tienen secciones elípticas cruzadas, midiendo 6 por 5 m en sus ejes de mayor dimensión. Solo una de las dos antenas está diseñada para transmitir mensajes y la otra para recibirlos, pero ambas emplean polarización circular derecha, por lo que están montadas en lados opuestos del vehículo espacial, para que la distancia entre ellas sirva como aislador de frecuencias.



**Figura 4.21** Satélite MSAT. Cada satélite posee un PIRE aproximado de 55 dBW, y está equipado con dos repetidores independientes y dos FETs de reserva. Los repetidores directos trasladan los mensajes recibidos en banda Ku, a banda L para después transmitirlos a las terminales móviles, y viceversa. (Cortesía de TMI Communications Inc.)

La cobertura de cada satélite se muestra en la figura siguiente. Las enormes antenas de éstos, en unión con la alta capacidad eléctrica generada por sus paneles solares, les permite operar 11 haces puntuales; cinco dirigidos hacia Canadá, cuatro hacia Estados Unidos (Este, Centro, Norte y Oeste), uno hacia México, Puerto Rico y el Caribe, y un último, dividido, cubre a Alaska y Hawaii. Dicha cobertura incluye además, cerca de 400 Km de litoral en el área continental atendida. De esta manera, cada satélite actúa como un servicio complementario y de respaldo respecto al otro.



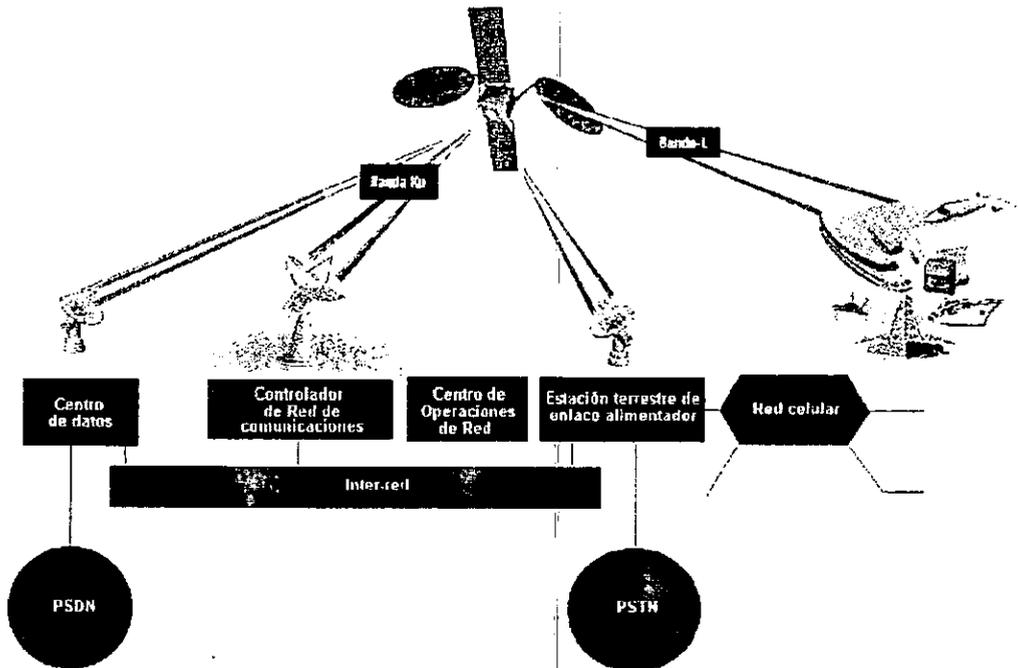
**Figura 4.22** Cobertura geográfica de los satélites MSAT, resultado de un análisis estadístico y experimental con la superposición de todos los haces. (Cortesía de Westinghouse Wireless Solutions Company.)

Por su parte, el segmento de comunicaciones terrenas, es administrado por la estación de control central (CGS- Control Ground Station), ya que cada transmisión que ocurre sobre la red, es procesada aquí, y es a través de ésta, que un usuario móvil puede conectarse a los sistemas terrestres (Figura 4.23) como lo son: la red pública de telefonía (PSTN -Public Switching Telephony Network), la red pública de datos (PSDN -Public Switching Data Network), Datapac (transmisión de datos por línea telefónica), y líneas privadas de comunicación.

Dicha estación está compuesta por: una antena de reflector parabólico de 11 m de diámetro (igual que la estación de control de Inmarsat); el centro de operaciones de la red (que realiza las funciones de supervisión y control); el controlador de comunicaciones (encargado de asignar los canales de comunicación); una estación terrena de enlace tributario (que conecta con la PSTN); y un conmutador de paquetes DPN-100 de Northern Telecom como centro de datos (que proporciona la interface terrestre con las redes privadas de datos).

Debido a que la CGS es un recurso compartido por todos los usuarios de paquetes de datos de MSAT, su desempeño puede variar. Cada salida de un canal (CGS-satélite) típicamente soporta una velocidad de datos de 3000 bps, mientras que en la entrada de un canal (satélite-CGS) se recibe 1650 bps, nominalmente.

La CGS contiene además, esenciales medidas de control, como son: autorización e identificación de acceso al conmutador; solicitud, y facturación de llamadas/sesiones; y programas de mantenimiento de la estación satelital.



**Figura 4.23** Configuración de la red terrestre de MSAT. (Cortesía de Westinghouse Mobile Satellite Communication.)

#### 4.2.2 Comunicadores MSAT

El sistema satelital MSAT, provee tres tipos de servicios, todos codificados para protección de la comunicación:

##### *Servicio de telefonía.*

Este servicio disponible tanto para uso semi-fijo (lugares aislados o con redes no confiables) y uso totalmente móvil (personas constantemente viajan fuera de las coberturas de las redes móviles terrestres); soporta llamadas de voz, datos y facsimil. Las llamadas de voz se realizan igual que en un teléfono celular, pero a través del microteléfono del comunicador, facilitando:

- el envío incondicional de llamada
- envío de señal de ocupado
- envío de llamada sin respuesta
- llamadas limitadas
- llamada en espera
- y conferencia tripartita

Por su parte, la transferencia de datos (que incluye el intercambio de archivos entre computadoras personales y sistemas de acceso remoto, como el correo electrónico) emplea un módem integrado al comunicador, que opera de manera asíncrona a 2400 bps (próximamente se dispondrá de un módem que operará a 4800 bps); mientras que en la transferencia de faxes, se hace uso de los protocolos de conmutación por mensajes (store and forward) y de retransmisión en caso de detección de error (ARQ).

##### *Servicio de radio despacho.*

Este es un servicio de radiocomunicaciones móviles bidireccionales vía satélite, que permite entablar comunicación con un grupo de personas a través de una canal común del satélite, dispuesto por asignación por demanda, facilitando y agilizando las tareas en equipo. Dicho servicio permite a una organización formar de 1 a 15 grupos de usuarios predefinidos, conocidos como grupos de conversación (Talk Groups). Para iniciar una conferencia basta presionar el indicador del grupo al que desea acceder (de entre los grupos preestablecidos por la organización) y presionar el botón PTT (push to talk). El enlace satelital se realiza en cuestión de segundos y cuando el canal está libre, el comunicador lo señala con un sonido. Además, el comunicador cuenta con un modo temporal para conversaciones privadas entre dos usuarios.

### *Servicio de paquetes de datos.*

Este servicio permite reunir y transmitir información digital rápida y eficientemente. Está diseñado para soportar transmisiones asincrónicas y síncronas, empleando el protocolo de transmisión de conmutación por paquetes. Los dispositivos básicos para el establecimiento de un circuito virtual de extremo a extremo, entre dos dispositivos de usuario, son: una unidad terminal remota (RTU) acoplada a un comunicador MSAT, y una terminal principal de computadoras interconectada a la central de datos de TMI o de ASMC (según el satélite utilizado) a través de la PSDN, la PSTN o líneas privadas de comunicación<sup>1</sup>.

En este servicio, las transmisiones asincrónicas proporcionan un medio ideal en transmisiones de bajo costo para dispositivos de datos como las computadoras personales, las cuales son conectadas directamente en un puerto del comunicador MSAT, que transporta los datos asincrónicos a un canal integral único (PAD-Packet Assembler/Disassembler), donde son empaquetados para su transmisión hacia el satélite.

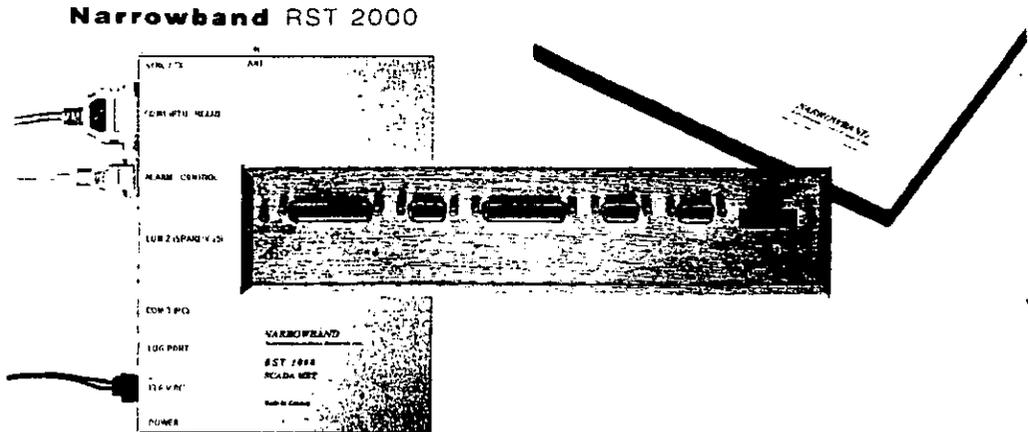
De manera complementaria, la transmisión síncrona de paquetes de datos, emplea el protocolo de interface CCITT X.25 para comunicar idealmente, una terminal principal de computadoras con un comunicador MSAT, o bien, dos comunicadores MSAT (este servicio también está disponible para dispositivos de usuario de operen en base al protocolo X.25).

El servicio de paquetes de datos de MSAT, soporta paquetes de 32, 64, 128, y 256 bytes. Uno de estos tamaños (el que mejor acomode el tráfico generado) puede ser pre-asignado como valor único en una transmisión, o bien, éste puede ser asignado de acuerdo a una base de relación en cada llamada.

Hasta la fecha, tanto TMI Communications Inc., como ASMC han autorizado a las compañías Narrowband Telecommunications Research, Mitsubishi Electric Corporation y Westinghouse Electric Corporation, para construir y distribuir los comunicadores MSAT, los cuales además de soportar dispositivos estándares asincrónicos y X.25 síncronos, conectados directamente al conmutador vía cable estándar RS232; operan únicamente, después de presionar las teclas clave del mismo, haciendo obligatorio que éstos sean registrados y dados de alta para su uso.

<sup>1</sup> De manera opcional, los circuitos extremo a extremo, pueden ser circuitos virtuales conmutados en los que es necesaria la solicitud de llamada (vía un canal de acceso aleatorio, aloha ranurado) y varía la trayectoria de enrutamiento, o bien, pueden ser circuitos virtuales permanentes, en los que se pre-establece el destino de la llamada, evitando la necesidad de respuesta del receptor y eliminando el tiempo de petición de la llamada (menos de 5 seg).

Narrowband inicio la creación de un comunicador MSAT diseñado para uso exclusivo del servicio de transmisión de paquetes de datos de MSAT (Figura 4.24 y Tabla 4.7).



**Figura 4.24** Comunicador MSAT RST 2000 de Narrowband. (Cortesía de TMI Communications Inc.)

**Tabla 4.7** Comunicador MSAT RST 2000 de Narrowband. (Cortesía de TMI Communications Inc.)

Características	Especificaciones Técnicas
2 puertos de interface para dispositivos terminales asincrónicos de usuario.	banda de tx: 1626.5 - 1660.5 MHz banda de rx: 1525.0 - 1559.0 MHz
Puerto X.25 opcional para comunicación síncrona de datos.	tasa de datos, tx: 2400 bps tasa de datos, rx: 4800 bps
Interface para circuitos de control, para 4 puntos externos de alarma y para 2 contactos de acción de cierre.	corriente de operación: en estado de alerta: 3 mA, en rx: 650 mA, en tx/rx: 1.8 mA
Modo de espera para un consumo de energía extremadamente bajo.	Requerimientos de potencia: 12V DC (nominal), batería/solar
Facilidad para transmisiones por petición, por evento y sincronizadas.	Transreceptor → 2.5 Kg 28.8(L) cm x 22.5(A) cm x 6.5(h) cm.
Configuración local o remota de los parámetros de comunicación	Antena → 0.8 Kg 42.5(L) cm x 2.2(A) cm x 31(h) cm
Capacidad de envío, recepción y almacenamiento de mensajes electrónicos.	Temperatura de operación: -50° C a +60° C (temp. ambiente)

Por su parte, el comunicador MSAT de Mitsubishi Electric Corporation cuenta con un microteléfono especial (con botones de interrupción PTT y de emergencia, un teclado de marcación por tonos, una pantalla LCD, teclas de funciones e indicadores de estado) y un radio externo. Además, es posible la integración de un microteléfono de telefonía móvil o bien uno de operación dual (celular/satelital) para soportar dicho servicios (Figura 4.25 y Tabla 4.8).

### Mitsubishi DiamondTel Series

MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION  
TELECOM PRODUCTS

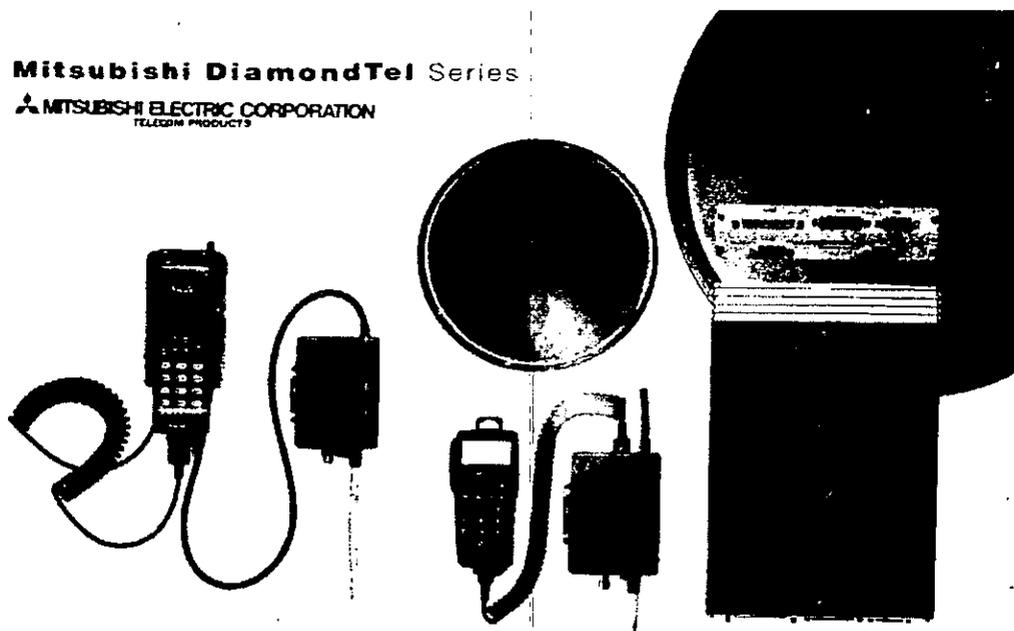


Figura 4.25 Comunicador MSAT de la serie DiamondTel de Mitsubishi. (Cortesía de TMI Communications Inc.)

Tabla 4.8 Datos generales del Comunicador MSAT de la serie DiamondTel de Mitsubishi. (Cortesía de TMI Communications Inc.)

Características	Especificaciones Técnicas
Modo de operación dual. celular/satelital.	banda de tx: 1626.5 - 1660.5 MHz banda de rx: 1525.0 - 1559.0 MHz
Microteléfono de características similares al de un sistema celular.	tasa de voz codificada: 6400 bps, IMBE tasa de datos, tx: 2400 bps tasa de datos, rx: 4800 bps
Diseño de fácil instalación y compatible con los receptores GPS.	Transceptor → 1.8 Kg 30.5(L) cm x 20.3(A) cm x 5.1(h) cm

continúa.....

Microteléfono opcional para servicio de despacho con tecla PTT.	Antena → domo: 2.7 Kg, disco: 2.7 Kg domo: 17.8(L) cm x 17.8(h) cm disco: 37.6(L) cm x 4.6(h) cm
Disponible en configuraciones transportables.	Corriente de operación: 1.9 A en modo de alerta.
Comunicaciones bidireccionales para datos.	Temperatura de operación: -30° C a +43° C (temperatura ambiente)

De manera favorable, el comunicador MSAT de Westinghouse Electric Corporation, permite emplear el microteléfono de telefonía móvil y presionar DTMF '1' o '3' como PTT y de manera similar, una secuencia de teclas DTMF sirve como interruptor de emergencia. Este microteléfono posee un teclado de marcación por tonos, una pantalla LCD, teclas de función e indicadores de estado, además de presentar una versión de operación dual, en modo celular/satelital, el cual permite elegir (en dado caso) el sistema por el cual se desea atender la llamada sin la necesidad de portar dos terminales. De esta manera, el comunicador MSAT de Westinghouse, puede ser usado para el servicio de telefonía móvil, sin modificaciones en hardware ni en software (Tablas 4.9 y 4.10, y Figuras 4.26 y 4.27).

**Tabla 4.9** Especificaciones Técnicas del Comunicador MSAT de la serie 1000 de Westinghouse Electric Corporation. (Cortesía de Westinghouse Mobile Satellite Communications.)

Banda de frecuencias	recepción: 1525 - 1559 MHz transmisión: 1626.5 - 1660.5 MHz
Separación de canales	6 KHz
Corriente de operación	2 A (recepción)
Peso y dimensiones del transreceptor	3.4 Kg, 30.8(L) cm x 18(A) cm x 5.7(h) cm
Peso y dimensiones de la antena	3.4 Kg, 22.6(L) cm x 18(A) cm x 6.4(h) cm
Temperatura de funcionamiento	-35° C a +60° C
PIRE	12.5 dBW, 16.5 dBW
Antena	9 dBi Medio 13 dBi Alto
Angulo visual de la antena	15° a 70° por encima del horizonte

**SERIES 1000 Mobile Satellite Telephone – Technical Specifications**

<p><b>Frequency Range:</b> 1525-1559 MHz (Receive) 1828.5-1868.5 MHz (Transmit)</p> <p><b>Channel Spacing:</b> 5 kHz</p> <p><b>Operating Current:</b> 2A (Receive)</p> <p><b>Operating Temperature:</b> -38°F to 130°F (-35°C to 55°C)</p> <p><b>Radiated Power:</b> 12.5 dBW to 16.5 dBW</p>	<p><b>Omni-Directional Mast Antenna</b> Mast: 8.8" diameter x 37"H 12 cm diameter x 94 cm H) Weight: 2 lb (0.9 kg) Gain: 8.3 dBiic Nominal</p>
---	--

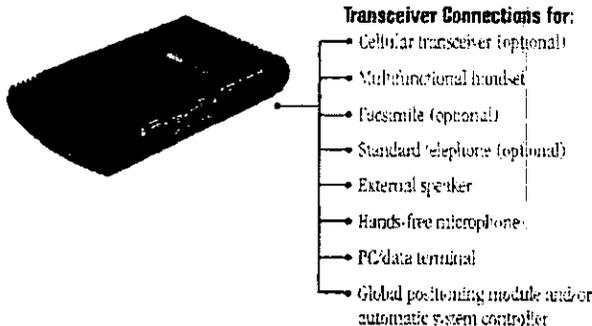
  

<p><b>Transceiver</b> 12" L x 7" W x 2" H (30.5 cm L x 17.8 cm W x 5.3 cm H) Weight: 7.5 lb (3.4 kg) Options: Packet Data, Facsimile and standard telephone</p>	<p><b>Multifunctional Handset</b></p>	<p><b>Cellular Transceiver (Optional)</b> 8" L x 3.3" W x 1" H (20.5 cm L x 8.3 cm W x 2.8 cm H) Weight: 1.3 lb (0.6 kg)</p>	<p><b>Hands-free Microphone</b></p>	<p><b>Medium Gain Contoured Antenna</b> 10.4" L x 8.4" W x 7.5" H (mounted) (26.4 cm L x 21.8 cm W x 19 cm H) Weight: 2.2 lb (1.0 kg) Gain: 9.8 dBiic Nominal</p>
---	---------------------------------------	--	-------------------------------------	---

<p><b>Antenna Electronics Unit</b> 9" L x 7" W x 2.5" H (22.9 cm L x 17.8 cm W x 6.4 cm H) Weight: 7 lb (3.2 kg)</p>	<p><b>Super High Gain Dome</b> 2.3" dia. x 28" H Weight: 45 lbs Gain: 18 dBiic Nominal</p>
--	--

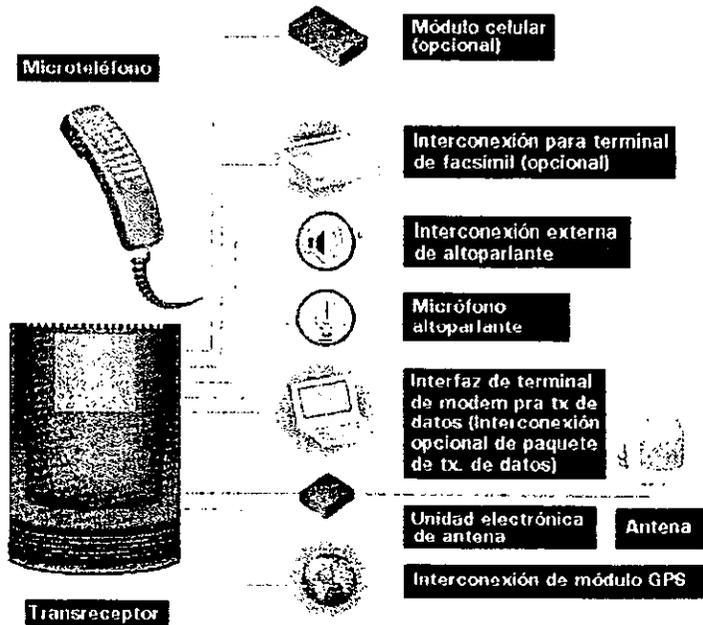
CABLES AND UNIVERSAL MOUNTING BRACKETS INCLUDED



**Figura 4.26** Comunicador MSAT, serie 1000 de Westinghouse Electric Corporation. (Cortesía de Westinghouse Wireless Solutions Company.)

**Tabla 4.10** Características del comunicador MSAT de la serie 1000 de Westinghouse. (Cortesía de Westinghouse Mobile Satellite Communications.)

Operación de manos libres
Cualquier botón para contestar (excepto <i>Volume</i> o <i>End</i> ) -simplemente oprimiendo
Contestador automático al tercer timbre
Bloqueo electrónico para prevenir llamadas no autorizadas
Indicador de llamadas para saber el número de llamadas no contestadas
Memoria para 90 números alfanuméricos, más 10 números de emergencia
Sistema de restricción de llamadas programable a través de una clave privada
Timbre de alerta activable para recepción de llamadas
Operación telefónica / transmisión de datos alternada
Interconexiones para ubicación de datos integrado al PC y GPS
Microteléfono dúplex completo con botón pulsador para telecomunicación telefónica
Módulo celular opcional, grupo fax III, y capacidad para interc. de paquetes de datos
Operación sin asistencia para equipo conectado de fax, tx. de datos y mensajes
Múltiple selección de configuración de antena



**Figura 4.27** Sistema de telefonía móvil vía satélite, de la Serie 1000 de Westinghouse. (Cortesía de Westinghouse Mobile Satellite Communication.)

### 4.3 SOLIDARIDAD

Con la aproximación del término de la vida útil de los satélites Morelos y el crecimiento en la demanda de servicios de comunicación en 1989 se decidió la creación de la segunda generación de satélites mexicanos, denominada "Solidaridad", por acuerdo del Ejecutivo Nacional.

En febrero de 1990, se dio inicio a la distribución de las especificaciones preliminares del sistema Solidaridad, elaboradas por la SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) y TELECOMM (Telecomunicaciones de México), la cual culminó el mes de diciembre con la publicación de la convocatoria para la adquisición de las bases de licitación del Sistema, en la que además de asentaron las especificaciones técnicas, las características para las opciones de financiamiento y para el programa de administración de riesgos.

Estas bases, adquiridas por General Electric, Hughes Aircraft Company, Matra Space y Alcatel, fueron analizadas y evaluadas por la SCT y Telecomm, con la asesoría de consultores externos como: Satel Conseil (Francia), Telesat (Canadá) y Comsat (USA), emitiendo su fallo el 19 de marzo de 1991, a favor de Hughes Aircraft Company <sup>1</sup>.

Posteriormente, habiendo dado a conocer la convocatoria para la prestación de los servicios de lanzamiento, el 31 de mayo de ese mismo año, se firmaron: el contrato de fabricación de los satélites con Hughes Aircraft; y con Telesat, el de asesoría en el proceso de supervisión.

Por su parte, las bases de licitación para el lanzamiento de los satélites, fueron adquiridas por: General Dynamics Commercial Launch Services (USA), Great Wall Industry Corp. (China), y Arianspace (Francia) <sup>2</sup>, resultando seleccionada, ésta última, quien firmó el acuerdo respectivo, el 23 de septiembre del 1991. Esta fecha marcó el inicio de reuniones periódicas de coordinación satelital con los Estados Unidos, Canadá, INMARSAT y la Ex-Unión Soviética, con la finalidad de evitar interferencias entre los sistemas.

<sup>1</sup> Los satélites Morelos I y II también fueron construidos por Hughes Aircraft Company. El contrato para la construcción de los satélites Solidaridad fue por \$184 millones de dólares.

<sup>2</sup> Arianspace es una corporación multinacional (encabezada por Francia), fundada en 1980, que integra la capacidad científica, tecnológica y financiera de 50 empresas de Francia, Alemania, Inglaterra, Dinamarca, España y los Países Bajos. Entre sus ventajas más importantes, destaca la ubicación de su base de lanzamiento en Kourou, Guayana Francesa, a 5° de latitud norte del ecuador.

### 4.3.1 Configuración espacial

El sistema satelital Solidaridad está compuesto por dos potentes satélites de estabilización triaxial, modelo HS 601 de Hughes; los cuales fueron colocados en las longitudes de 109.2° O (Solidaridad I) y 113.0° O (Solidaridad II), el 19 de noviembre de 1993 y el 7 de octubre de 1994, respectivamente <sup>1</sup>.

Dichos satélites, lanzados a bordo de cohetes Ariane 4, tenían un peso total de 2773.23 Kg en Tierra, del cual 1492.8 Kg se debían al combustible contenido. Sin embargo, este último se redujo a 383.83 Kg a causa del tipo de satelización empleada (inyección en órbita elíptica de transferencia), la cual fue posible mediante el motor de apogeo, integrado por un sistema de propulsión líquida Marquardt de 490 newtons (contenido en cuatro tanques, presurizados por Helio después del lanzamiento). Adicionalmente el sistema de propulsión (probado en vuelo) incluye doce impulsores de 22 newtons (N), situados en diversas partes del satélite, para realizar las maniobras necesarias para mantenerlo en órbita.

Como se aprecia en la figura 4.28, cada uno de los satélites consta de una porción central en forma de cubo que aloja a los sistemas electrónicos y de propulsión, y que conecta en cada lado de su eje norte sur (-Y, + Y) un brazo de soporte para el arreglo de los tres paneles de celdas solares de silicio K4-3/4 (cada panel mide 2.16 x 2.54 m). Las cuales conforman un total de 56 circuitos de celdas solares, que proporcionan al satélite una potencia de 3370 W para alimentar los diferentes subsistemas durante su vida útil, de aproximadamente 14 años.

Situadas en las cuatro esquinas de la superficie más lejana del cuerpo del satélite respecto a la Tierra (el cenit 0-Z), se encuentran las baterías de la nave, construidas a base de celdas de Niquel-Hidrógeno, agrupadas en 1 paquete de 6 celdas y 3 paquetes de 7 celdas, diseñadas para proveer una capacidad de 160 A/h durante los eclipses <sup>2</sup>.

La carga útil de los mismos, contiene un transpondedor en banda L que cuenta con amplificadores de potencia de estado sólido enlazados en paralelo, así como 16 transpondedores activos en la banda Ku alimentados por tubos de ondas progresivas.

<sup>1</sup> El Satélite Solidaridad II, ocupa una posición muy cercana a la que fue utilizada por el satélite Morelos I (113.5° O, retirado de su órbita en marzo de 1994), mientras que el Morelos II, ha sido desplazado a 116.8° O para continuar en operación, posiblemente hasta el tercer trimestre de 1998. Las comunicaciones de los usuarios del Morelos I fueron transferidas hacia el satélite Solidaridad I.

<sup>2</sup> el voltaje medio durante un eclipse es de 33.5 Volts.

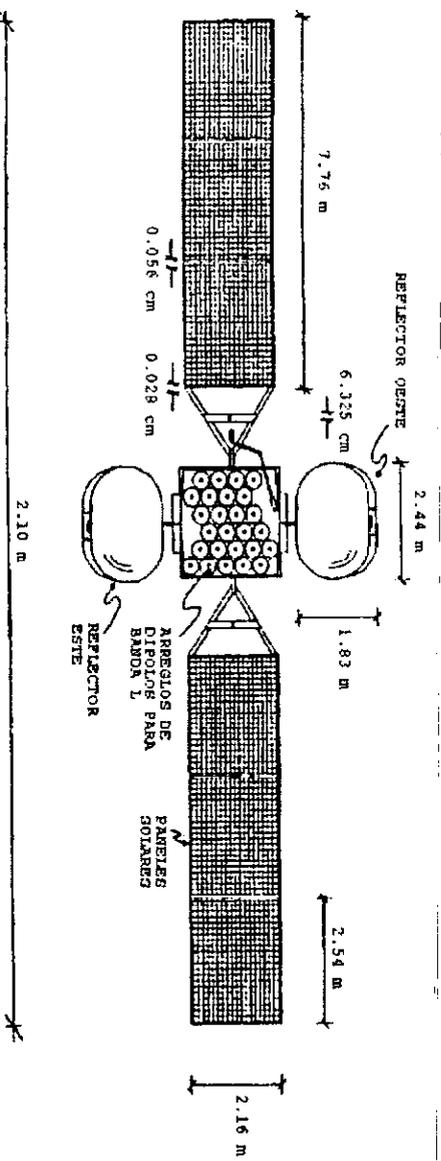
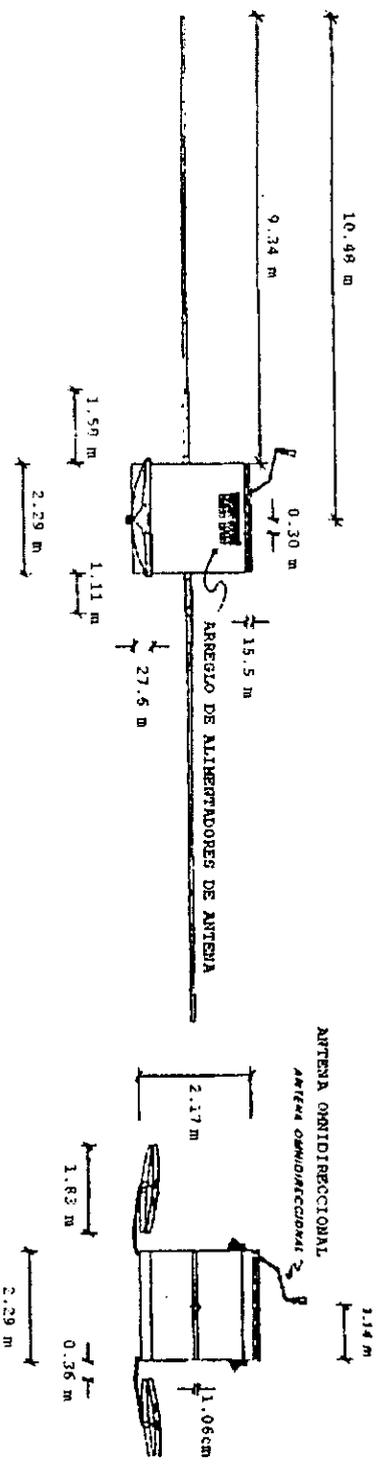


Figura 4.28 Dimensiones de los satélites Solidaridad. (Cortesía de TELECOMM.)

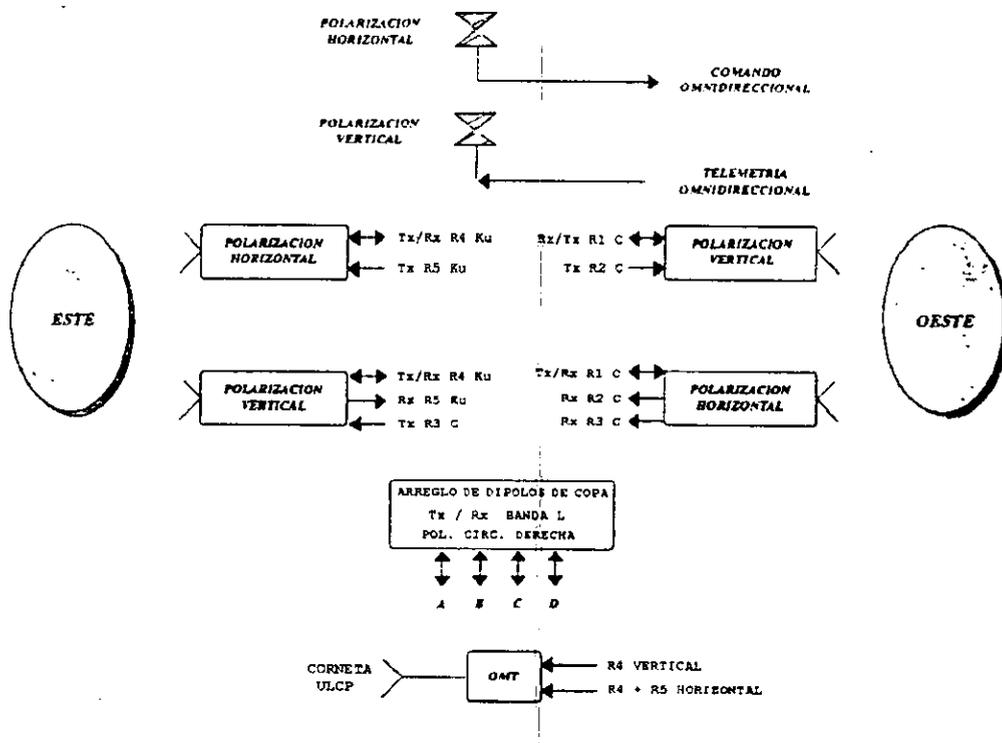
Sin embargo, debido a que los satélites Solidaridad, fueron creados con la intención de dar continuidad a los servicios de los satélites Morelos, éstos no son satélites exclusivos para comunicaciones móviles y también cuentan con 18 transpondedores activos para comunicaciones fijas en banda C como se aprecia en la siguiente tabla.

**Tabla 4.11** Características del subsistema de comunicaciones de los satélites Solidaridad. (Cortesía de TELECOMM.)

Descripción	Características		
	Banda C	Banda Ku	Banda L
No.de transpondedores	12 de 36 MHz 6 de 72 MHz	16 de 54 MHz	1 de 13.5 MHz (Sol-I) 1 de 13.0 MHz (Sol-II)
Espaciamiento de transpondedores	40 MHz 80 MHz	61 MHz	
Potencia de salida promedio	PIRE 37.5 dBW PIRE 40 dBW  16 SSPA's* de 10 a 16 watts  8 SSPA's de 14.4 watts	PIRE 47 dBW  20 TWTA's* de 45 watts	PIREA* 45.5 dBW  6 SSPA's de 24 watts
Bandas de frecuencia			
Transmisión (MHz)	3,700 - 4,200	11,700 - 12,200	1,525 - 1559
Recepción (MHz)	5,925 - 6,425	14,000 - 14,500	1,626 - 1,660
Capacidad de atenuador	0-14 dB en pasos de 2 dB	0-22 dB en pasos de 2 dB	0-15 dB en pasos de 1 dB

Dichos transpondedores operan a través del sistema de antenas del satélite, el cual está conformado por dos reflectores ovalados (2.4 por 1.8 m) con alerones en X, de doble superficie reflejante (una sensible a polarización vertical y otra a la polarización horizontal), montados en el lado Este (para banda C y Ku) y lado Oeste (banda C) del cuerpo del satélite; un arreglo de 26 antenas dipolo tipo copa para banda L montado en el nadir (lado orientado hacia la Tierra) del cuerpo del satélite; y una antena omnidireccional utilizada para los comandos de puesta en órbita (Figuras 4.28 y 29).

\* Consúltese el glosario

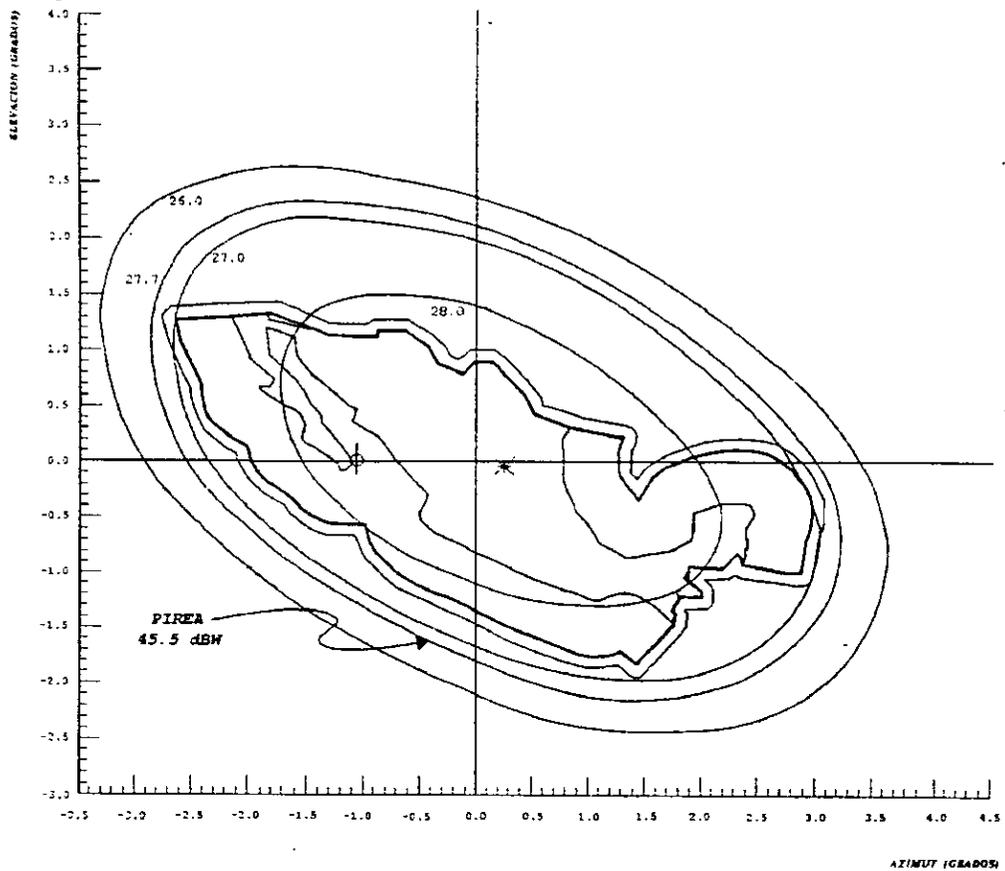


**Figura 4.29** Diagrama funcional del sistema de antenas de los satélites Solidaridad. (Cortesía de TELECOMM.)

La facilidad de conmutación de transpondedores a distintos haces de las antenas en los satélites Solidaridad ha permitido dividir la cobertura de las mismas en seis regiones, mostradas en la tabla 4.12.

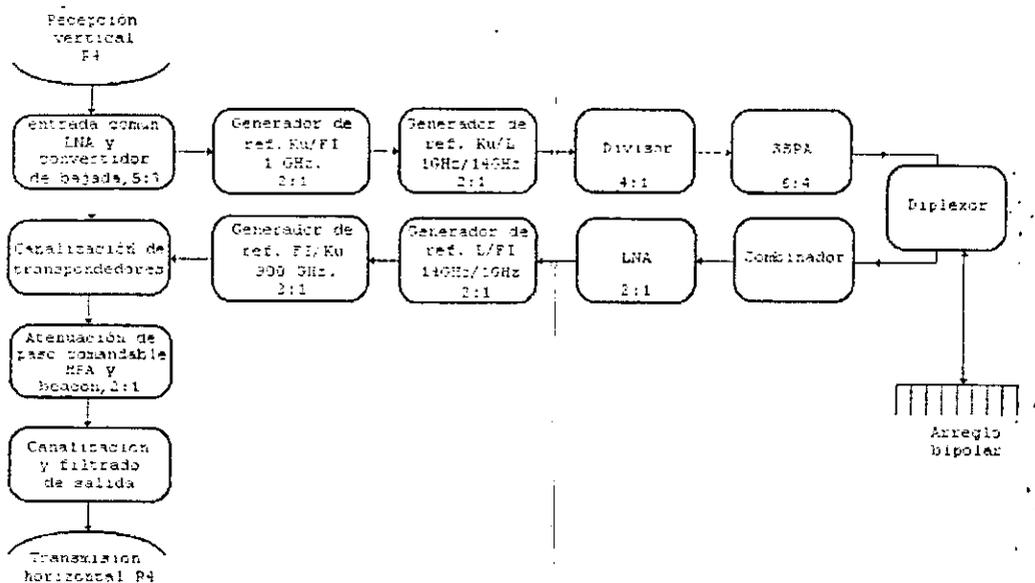
**Tabla 4.12** Regiones de cobertura del sistema de satélites Solidaridad.

Región	Banda	Cobertura
R1	C	México, sur E.U.A., Guatemala, Belice, Honduras y el Salvador.
R2	C	Región 1, incluyendo el sur de Florida, El Caribe, Centroamérica, Colombia y Venezuela.
R3	C	Sur de Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Paraguay, Uruguay, Chile, oeste de Brasil y Argentina.
R4	Ku	México, sur de los E.U.A., Guatemala y Belice.
R5	Ku	Toronto, Canadá, La Habana y ciudades más importantes de E.U.A.
R6	L	México y su mar patrimonial (véase la figura 4.29)



**Figura 4.30** Cobertura en banda L de los satélites Solidaridad. Ganancia pico de 28.86. (Cortesía de TELECOMM.)

Para los enlaces de comunicación móvil con la estación terrena, los satélites Solidaridad emplean la parte baja del transpondedor 5 de banda Ku (5K), operando a una frecuencia central de 14274 MHz para enlaces ascendentes y 11974 MHz para enlaces descendentes, éstos con polarización vertical y horizontal, respectivamente. Mismos que corresponden a la cobertura de la región R4. De manera complementaria, el transpondedor de banda L (con cobertura de y hacia la región R6) realiza los enlaces con las terminales móviles. Así, las transmisiones de la estación terrena se reciben en banda Ku para ser trasladadas a una frecuencia intermedia (IF-Intermediate Frequency) y posteriormente a banda L para ser transmitidas a la terminal móvil. Obviamente, sucede lo contrario para enlaces móvil-estación terrena (Figura 4.31 y tabla 4.13).

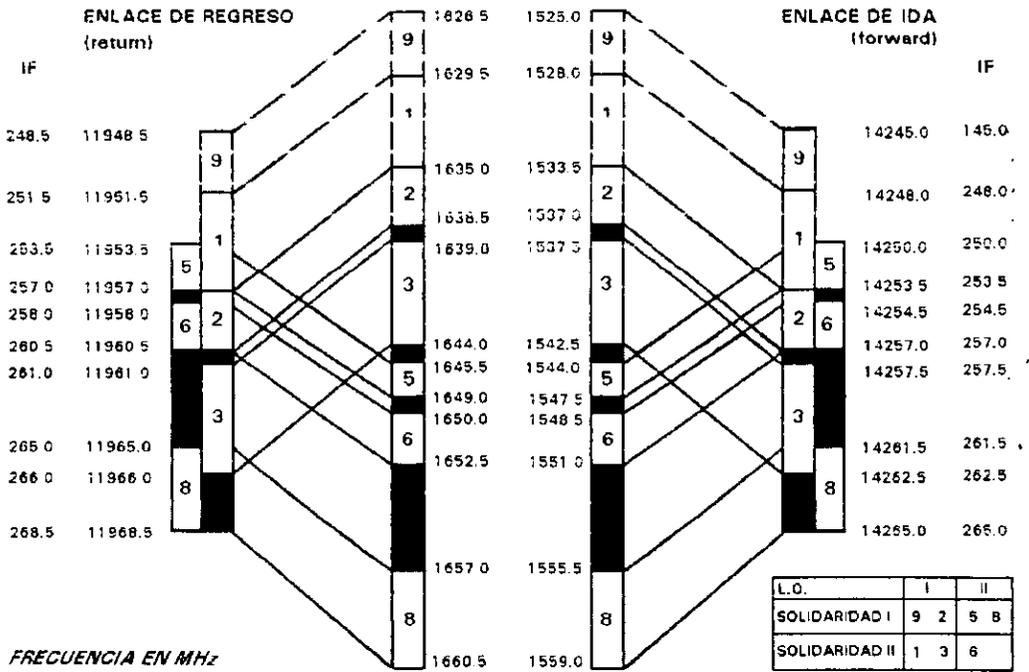


**Figura 4.31** Diagrama de bloques de la interacción de los repetidores de banda Ku y L de los satélites Solidaridad.

**Tabla 4.13** PIREA y G/T de los satélites Solidaridad. (Cortesía de TELECOMM.)

PIREA (dBW)		G/T (dBW/K)	
Banda L	banda Ku	Banda L	Banda Ku
45.5 Litoral	41.5	-1.1 Litoral	+2.5
46.4 Area continental		-0.2 Area continental	

Para evitar interferencia, el transpondedor de banda L ha sido dividido en 4 sub-bandas (para un total de 13.5 MHz) en Solidaridad I y tres en Solidaridad II (para un total de 13.0 MHz), quedando establecido el plan de frecuencias para comunicaciones móviles, como se muestra en la figura 4.31. Dichas sub-bandas, independientemente controlables con un rango de ancho de banda de 2.5 a 8 MHz son, además, contiguas a la banda Ku dentro del canal 5, permitiendo así, el uso del ancho de banda remanente de un canal de 27 MHz de la banda Ku.



**Figura 4.32** Plan de frecuencias para los enlaces de comunicación móvil en los satélites Solidaridad. (Cortesía de TELECOMM.)

Respecto a las instalaciones de Centro de Control Primario, ubicadas en Iztapalapa, México D.F. (ya empleadas para la operación y control del sistema Morelos), tuvieron que ser ampliadas para llevar a cabo, funciones asociadas a todas las fases de puesta en órbita del sistema Solidaridad, así como todas las funciones principales para el mantenimiento en órbita, el control y verificación de parámetros técnicos, y el desarrollo de diversas pruebas de las diferentes señales de comunicación del sistema; además, se realizó la construcción de un centro alternativo en Hermosillo, Sonora. Estos disponen de los sistemas y subsistemas señalados en la tabla 4.14

**Tabla 4.14** Infraestructura de los Centros de Control Terrestre para el sistema Solidaridad. (Cortesía de TELECOMM.)

<b>Centro de Control Primario</b>
Una antena banda C de 12 m de diámetro para TT&C *
Tres antenas banda C de 11 m de diámetro.
Tres antenas banda Ku, de 8.1, 7.6 y 4.6 m de diámetro.
Equipo para pruebas en órbita
Laboratorio de pruebas de carga útil.
Sistema de monitoreo de comunicaciones.
Simulador dinámico de los satélites Solidaridad y Morelos.
Subsistema de cómputo de control del satélite.
Subsistema de banda base.
Subsistema de RF.
Software de telemetría, comando y rango.
Interface de comunicaciones de datos.
<b>Centro de Control Alterno (CCA)</b>
Dos antenas Banda C de 11 m de diámetro.
Dos antenas banda ku de 4.5 y 2.4 m de diámetro.
Una antena banda L de 2.4 m de diámetro.
Sistema de monitoreo de comunicaciones.
Subsistema de RF.
Subsistema de banda base.
Subsistema de cómputo de control del satélite.
Interface de comunicación de datos.

\* Consúltese el glosario

### 4.3.2 Servicios de comunicación móvil del sistema Solidaridad

Los servicios de comunicación móvil que el sistema Solidaridad ofrece son Movisat Datos, recientemente Movisat Voz y próximamente Ruralsat, los cuales pueden conectarse con los Centros de Despacho de las compañías usuarias a través de las redes de telefonía pública, Telepac (X.25) y Telex.

*Movisat-Datos.* Es un servicio que permite la comunicación móvil bidireccional de datos a baja velocidad empleando la tecnología estándar C de Inmarsat, que permite las siguientes facilidades:

- Transferencia de mensajes- 600 bps y mensajes de hasta 120 caracteres.
- Reportes de datos (Poleo/GPS)
- Monitoreo remoto (SCADA)
- Llamadas a grupos de terminales móviles en un área geográfica específica y pruebas de verificación de la terminal

*Movisat Voz.* Es un sistema para comunicación móvil que utiliza la tecnología MSAT para proporcionar:

- Voz - Velocidad de 6.75 Kbps, e interoperabilidad con la telefonía celular.
- Datos - Datos en conmutación de circuitos a 2.4 Kbps.
- Fax grupo III - Velocidad de 2.4 Kbps.
- Control de redes (próximamente) - Multidestinos y llamadas a grupos.
- GPS (próximamente)

Las características de operación del servicio son:

- Asignación de canal 10 a 60 seg.
- Desconexión del circuito: 50 ms.
- Capacidad: procesamiento de 15 llamadas/seg.
- Disponibilidad: 99.95 %

*Ruralsat.* Es un servicio que provea comunicación a comunidades rurales de menos de 500 habitantes<sup>1</sup>, mediante terminales móviles (enlazadas con la red de TELMEX) que serán adaptadas para operar como teléfonos públicos a través del uso de tarjetas de débito.

<sup>1</sup> Algunos estados como Baja California cuentan con tecnología propia para comunicar a toda su población, mientras que otros estados como Sonora incluyen en su infraestructura de comunicaciones el uso de la banda C del sistema Morelos.

**Tabla 4.15** Características generales de los servicios del Sistema Solidaridad (Cortesía de TELECOMMM, julio 1996.)

<b>Movisat Datos</b>	
Terminal (incluye sistema GPS)	Inmarsat-C Trimbre: 4,500 USD aprox. Inmarsat-C Rockwell: 4,000 USD aprox.
Cuota de activación	50 USD por terminal
Cargo mensual	22.50 USD (8,000 caracteres libres de cargo)
Cargo adicional	0.0044 USD por caracter adicional
<b>Movisat Voz</b>	
Terminal	MSAT
Servicio móvil	Cargo mensual: \$ 20.00 USD Cargo /minuto: \$ 2.25 USD
Servicio Semifijo (telefonía rural)	Cargo mensual: \$ 20.00 USD Cargo /minuto: \$ 0.75 USD
<b>Ruralsat</b>	
Terminales Westinghouse	Antena y eq. transreceptor (incluye instalación): \$ 4,000 USD Microteléfono y accesorios adaptados: \$ 1,000 USD Sistema de energía solar opcional: \$ 2,400 USD
Cargo de TELMEX	mensual fijo: \$ 20 USD po minuto: \$ 0.75 USD

#### 4.4 ANALISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS GEOESTACIONARIOS EXPUESTOS

De manera implícita, estos sistemas presentan las desventajas típicas de los sistemas geoestacionarios; sin embargo, en las tablas 4.16, 4.17 y 4.18, se muestran las principales características comparativas que los hacen diferentes entre sí.

**Tabla 4.16** Parámetros comparativos de los satélites utilizados por los sistemas geostacionarios expuestos.

Parámetro	INMARSAT	MSAT	SOLIDARIDAD
Cobertura del sistema	Global (excepto zonas polares)	Canadá, EUA, México, Puerto Rico, el Caribe, Alaska y Hawaii.	México y su mar patrimonial
Bandas de frecuencias	1.6 / 1.5 GHz 6.4 / 3.6 GHz.	1626.5-1660.5 / 1525-1559 MHz 14-14.5 / 11.7-12.2 GHz.	1626.5-1660.5 / 1525-1559 MHz 14-14.5 / 11.7-12.2 GHz.
Número y Modelo	4 sat. Matra BAe Eurostar; 5 sat. serie 4000 de Lockheed	2 satélites MSAT (operados por AMSC y TMI).	2 satélites HS 601 de Hughes.
Posiciones orbitales	54° O - 55° O; 15.5° O; 64° E - 65° E; 178° E - 179° E.	101° O; 106.5° O.	109.2° O; 113° O.
Tiempo de vida	10 años; 13 años o más.	10 a 12 años.	14 años.
Fechas de lanzamiento	2 F1: 30/10/90; 2 F2: 08/03/91; 2 F3: 16/12/91; 2 F4: 15/05/92; 3 F1: 04/04/96; 3 F2: 06/09/96; 3 F3: 18/12/96; 3 F4: 26/07/97; 3 F5: 27/01/98.	finales de 1994.	Solidaridad I: 19/11/93 Solidaridad II: 07/10/94
Dimensiones (peso en órbita y tamaño)	Inmarsat-2: 800 Kg Inmarsat-2: 15.2 m	1,542 Kg 21.2 m	2,389.4 Kg 21 m
Capacidad	250 cios. Inmarsat-A; 2000-25000 cios. Inmarsat-A.	3,200 canales de 5 KHz cada uno.	
Potencia	1,200 W; 2,800 W.	3,000 W.	3,370 W.
Transpondedores para banda L	1; 2 (uno es para navegación).		1
PIRE/Banda L	39 dBW; 48 dBW.	55 dBW.	45.5 dBW.
Haces conmutados	ninguno (1 haz global); 1 global y 5 puntuales.	11 haces puntuales.	

**Tabla 4.17** Parámetros comparativos de las terminales móviles usadas por los sistemas geoestacionarios expuestos.

<b>Parámetro</b>	<b>INMARSAT</b>	<b>MSAT</b>	<b>SOLIDARIDAD</b>
<b>Terminales*</b>	Inmarsat-A Inmarsat Aero Inmarsat-B Inmarsat-C (versión portátil, 3.8 Kg). Inmarsat-M (mini-m, 2 Kg)	Westinghouse (3.4 Kg) Mitsubishi (1.8 Kg) Narrowband (2.5 Kg)	Inmarsat-C Westinghouse
<b>Antenas empleadas</b>	Reflector parabólico de 0.90 cm. Helicoidal cuadrifilar, dipolos cruzados transversales, de parches de microcinta y arreglos en fase. Reflector parabólico de 0.90 cm. Helicoidales cuadrifilares, dipolos cruzados inclinados y de microcinta. SBF, arreglos en fase de antenas helicoidales y de microcinta.	Arreglos lineales de parches cuadrados de microcinta, arreglos en fase de microcinta, antenas colectivas, y antenas direccionales formadas de un monopolio de 1/4 de $\lambda$ , rodeado de anillos concéntricos de elementos parásitos montados sobre un plano de tierra.	idem
<b>Ganancia de la antena (dBi)</b>	20-23; 12 y/o 0; 20-23; 0-3; 12 y/o 15.	9 - 13	
<b>PIRE - nominal (dBW)</b>	36; 13.5 y/o 25.5; 33; 12-16; 25	12.5 - 16.5	idem
<b>G/T (dB/K)</b>	-4; -26 y/o -13; -4; -22.8; -10 y -12.		
<b>Facilidades</b>	voz analógica y datos 9.6, 64 Kbps. datos 600 bps, voz/datos 10.5 Kbps. voz y datos a 16 y 64 Kbps. mensajes (120 c) 600 / 1200 bps. telefonía 4.8 Kbps y datos 2.4 Kbps.	voz codificada a 6.4 Kbps y datos (paquetes de 32, 64, 128 y 256 bytes) a 2,400 o 4,800 bps (a terminal de Narrowband solo opera servicios de datos).	

El peso indicado es únicamente el del equipo transreceptor.

**Tabla 4.18 Aspectos trascendentes de los sistemas expuestos.**

	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>INMARSAT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provee cobertura pseudoglobal (no en zonas polares).</li> <li>• Posee 4 posiciones orbitales.</li> <li>• Recientemente ha lanzado dos de sus satélites de tercera generación, ofreciendo enorme confiabilidad.</li> <li>• Su organización compuesta de casi 80 países, esta bastante consolidada.</li> <li>• Tiene la mayor experiencia de servicio, pues fue la primer organización en ofrecer comunicación móvil satelital.</li> <li>• Dispone de diversas terminales estándar que difieren en capacidad y servicios, pero que no presentan ningún riesgo de incompatibilidad con equipos terminales convencionales.</li> <li>• Es el único sistema satelital que provee terminales compactas exclusivas para mensajería de baja velocidad como son, el estándar D (visto en el capítulo 2) y el estándar E que se enlaza automáticamente con los centros de rescate (este estándar, no fue mencionado debido a falta de información relevante sobre él mismo).</li> </ul>	
<b>MSAT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sus satélites son hasta la fecha, los de mayor potencia para comunicaciones móviles comerciales.</li> <li>• Emplea terminales de tamaño similar al estándar mini-m de inmarsat pero operan a una velocidad mayor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su cobertura se limita a la zona norte de América, requiriendo de sistemas terrestres o satelitales, ajenos, para enlazar una llamada hacia el resto del mundo.</li> <li>• Sus terminales sólo ofrecen un rango de servicios (similar a estándar mini-M de inmarsat).</li> </ul>
<b>SOLIDARIDAD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sus satélites presentan un completo sistema de comunicación, pues éstos incluyen transpondedores en banda C y en banda Ku (adicionales) para comunicación fija.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su cobertura es bastante estrecha, sólo funcional para comunicaciones nacionales.</li> <li>• Al emplear terminales de otros sistemas, los servicios ofrecidos siempre estarán limitados al desarrollo de éstos, independientemente de la tecnología dispuesta en los satélites mexicanos. (por ejemplo, podría aprovecharse la capacidad en banda C para integrar servicios en la terminal).</li> </ul>

## 5

## ORBITAS TERRESTRES BAJAS E INTERMEDIAS

## 5.1 ORBITAS NO-GEO

Después de analizar en el tercer capítulo las características de los sistemas geostacionarios convencionales para la posible implementación de un sistema satelital de comunicación personal, es evidente que las pérdidas por trayectoria y el retardo de propagación sólo pueden ser real y eficazmente limitados mediante el uso de satélites más cercanos a las terminales, alojados en alguna órbita no-GEO:

- LEO (*Low Earth Orbits*) - órbitas circulares contenidas generalmente en el rango de 200 a 3,000 Km, entre las llamadas latitudes de densidad atmosférica constante y el cinturón de radiación más pequeño.
- MEO (*Medium Earth Orbits*) - son aquellas órbitas circulares de menor altitud que la órbita geostacionaria, las cuales pueden situarse a partir de la zona intermedia de baja radiación presente entre los anillos de Van Allen, de ahí que comúnmente sean conocidas como órbitas Intermedias.
- HEO (*Highly Elliptical Orbits*) - órbitas elípticas que comúnmente se aproximan por varios cientos de Km a la superficie terrestre (perigeo) y después sobrepasan la distancia de la órbita geostacionaria (apogeo).

Aunque las órbitas HEO son órbitas no-GEO, su uso resulta inapropiado para dicho objetivo, pues éstas presentan dos importantes desventajas. La primera, es la constante alteración del área de cobertura en órbitas elípticas inclinadas no ecuatoriales de bajo perigeo<sup>1</sup>, y la segunda y más importante, es el uso casi exclusivo del apogeo como zona orbital de comunicación, debido a que en éste el satélite se mueve lentamente y se mantiene en el cenit del observador por un largo periodo.

En ocasiones, dicha generalidad limita el aprovechamiento del resto de la órbita <sup>2</sup>. Sin embargo, el aspecto más aberrante es que dicho punto característico, típicamente se encuentra a una altitud similar o mayor a la de la órbita geoestacionaria, lo cual implica mayores pérdidas por trayectoria, prolongados tiempos de retardo y, obviamente, corrimientos Doppler de mayor magnitud que en los convencionales enlaces GEO.

Otro aspecto que limita el tipo de órbitas no-GEO en los sistemas satelitales de comunicación comercial es el uso de órbitas que faciliten el manejo, la organización y la predicción tanto de los satélites como de los parámetros de comunicación. Por tal razón, las órbitas óptimas para el uso de estos satélites más cercanos a las terminales, queda limitado al rango de órbitas síncronas circulares LEO y MEO, las cuales son particularmente apropiadas para sistemas de comunicación móvil celular debido a que el tamaño de las células de cobertura permanece constante a lo largo de la órbita facilitando además, la existencia de combinaciones de órbitas circulares inclinadas (retrógradas y prógradas) y polares para la obtención de una cobertura absolutamente global.

<sup>1</sup> Dicha alteración, se debe al achatamiento de los polos terrestres, pues el irregular campo gravitacional provoca una rotación del plano orbital que altera la excentricidad de la órbita elíptica, su altitud de perigeo y la duración de su período. Afortunadamente, existen órbitas de particular inclinación para disminuir esta inestabilidad, tales como la órbita Molniya y la órbita Tundra, las cuales mantienen sus apogeos en una latitud geográfica constante.

La órbita Molniya posee un período de medio día sideral (aproximadamente 12 h) y una inclinación orbital de 63.435° respecto al ecuador. La latitud de su perigeo es de 500 Km y la de su apogeo es de 39.800 Km. A causa del efecto Doppler, la velocidad de un satélite en dicha órbita genera un corrimiento de 8.7 ppm (partes por millón de la frecuencia portadora) en el enlace con la terminal ( $13.1 \text{ KHz} / f \sim 1.5 \text{ GHz}$ ) y de 87 ppm en el enlace con la estación base ( $95.7 \text{ KHz} / f \sim 11 \text{ GHz}$ ).

<sup>2</sup> En una solución muy avanzada, una antena de ancho de haz variable podría ser usada para mantener el tamaño de la célula terrestre constante, independientemente de su altitud orbital.

## 5.2 SISTEMAS SATELITALES LEO y MEO

### 5.2.1 Entorno espacial

En el espacio, todos los satélites, sin excepción experimentan efectos perjudiciales, como concentraciones térmicas y desprendimientos espontáneos de algún gas. Sin embargo, la radiación ionizante, principal perturbación espacial generada fundamentalmente por destellos solares y rayos cósmicos, afecta en mayor medida a los satélites en órbitas LEO y MEO que a los satélites GEO. Esto se debe, a que el campo electromagnético terrestre colecta la mayoría de las partículas cargadas en dos cinturones toroidales concéntricos de radiación (cinturones de Van Allen, figura 5.1), uno inferior integrado predominantemente de protones de alta velocidad y otro exterior conformado por electrones.

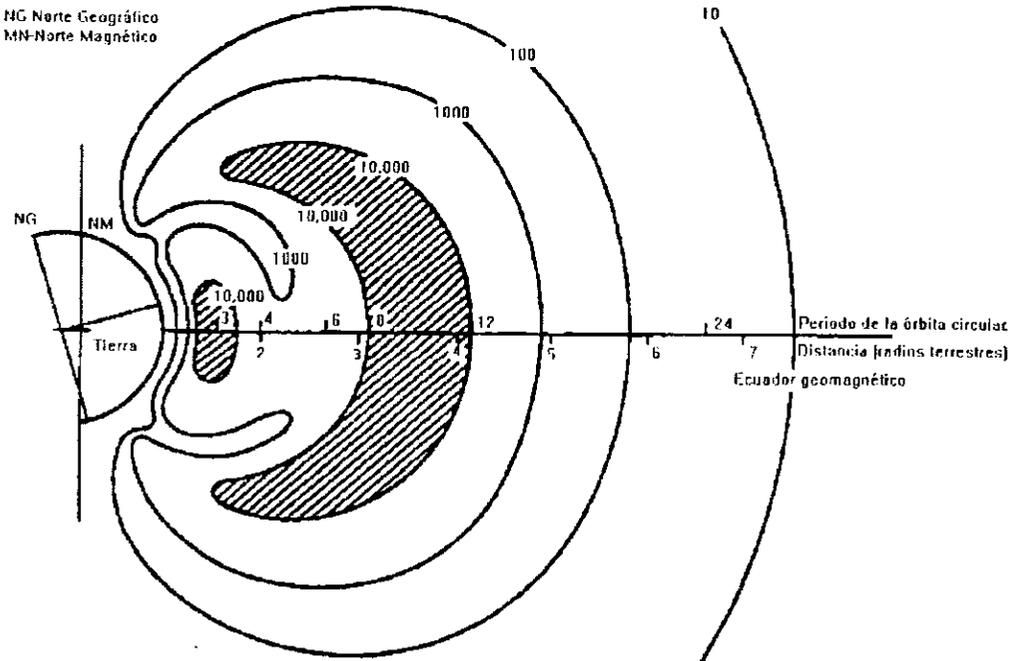
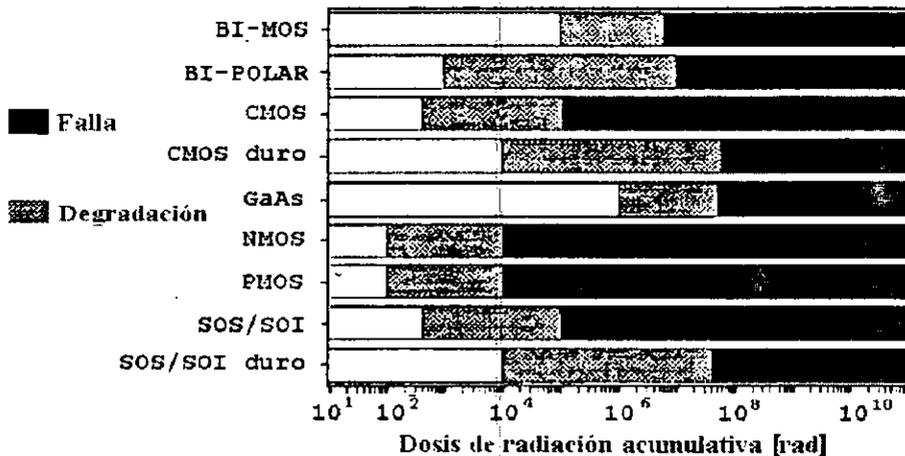
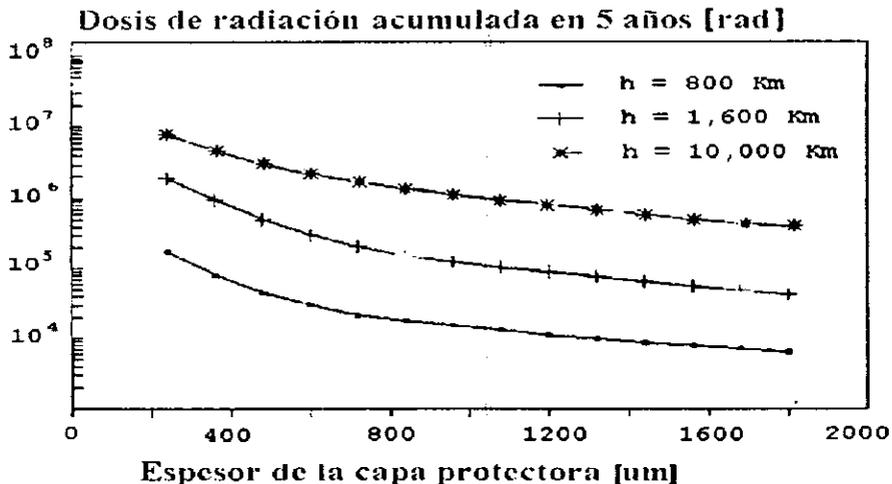


Figura 5.1 Niveles relativos de flujo en los cinturones de Van Allen.

No obstante que los niveles de radiación en éstos varían con la fecha del año, la latitud geográfica y las actividades solar y geo-magnética, la radiación promedio alcanza picos de alrededor de 2,200 y 18,500 Km sobre el plano del ecuador. Por tal razón, los satélites cercanos a dichas altitudes y en especial aquellos que orbitan dentro de estas regiones, requieren el uso de componentes electrónicos resistentes a la radiación (figura 5.2).



**Figura 5.2** Relación de la dosis de radiación recibida en relación al espesor de protección para tres órbitas circulares ecuatoriales sobre una misión de 5 años.

Si bien es obvio que los satélites que orbitan en altitudes inferiores a los cinturones de Van Allen están relativamente protegidos de los efectos de la radiación espacial, también es lógico pensar que a muy bajas altitudes se presente el efecto de erosión por oxígeno, principalmente sobre el borde anterior de los vehículos espaciales LEO, siendo entonces necesario el uso de un revestimiento formado de materiales compuestos o polímeros, vitales sobre las celdas solares, donde su vulnerabilidad tanto a la radiación como a la oxidación, implica la protección de un polímero grueso y transparente, o bien, de un revestimiento de vidrio.

Adicionalmente a dicha protección en las muy bajas altitudes, se suman la desventaja del flujo de escombros espaciales, que presenta su mayor densidad entre los 600 y 1100 Km, como el intenso e irregular campo gravitacional terrestre que aumenta la cantidad de meteoroides naturales y el número de maniobras de corrección de órbita que agotan el combustible disponible en los artefactos; creando así, un medio bastante hostil para los satélites LEO.

### 5.2.2 Plataforma satelital

Como la cobertura y la distancia de los satélites LEO y MEO son más pequeñas que en los satélites GEO, éstos utilizan un menor consumo de potencia para establecer la comunicación, y por tanto requieren de menores recursos que reducen en buen medida su tamaño y su masa; además, como se desplazan rápidamente alrededor del planeta, sin atender zonas únicas, la gran mayoría, cuando menos por plano orbital, deben ser idénticos, lo cual permite la producción en serie para reducir el costo de fabricación de los mismos.

A diferencia de los artefactos geoestacionarios, el bus o plataforma espacial de estos satélites, principalmente de aquellos de tipo LEO, incluye un complejo sistema de control orbital y de posicionamiento para mantener la inclinación del plano orbital contra las precesiones causadas por el intenso e irregular campo gravitacional terrestre. Los mecanismos adicionales para mantener la trayectoria orbital sin el encendido de los propulsores, salvo para corrección de fuertes perturbaciones; son:

- El torque magnético
- La compensación del gradiente de gravedad
- El giro de la masa
- La navegación por viento solar

Otra importante diferencia consiste en las baterías del satélite, las cuales son de menor tamaño debido a que los satélites LEO y MEO orbitan la tierra a una mayor velocidad que los satélites GEO (ec. 5.1), permaneciendo en la sombra por un menor periodo en relación a la ecuación 5.2:

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{r_E + h}}; \quad \omega_s = \sqrt{\frac{\mu}{(r_E + h)^3}}; \quad T_s = 2\pi \sqrt{\frac{(r_E + h)^3}{\mu}} \quad (5.1)$$

$$T_e = \frac{T_s}{\pi} \arccos \sqrt{\left[ \frac{r_E}{r_E + h} \right]^2 - \sin^2 \rho} \quad 0 \leq |\rho| \leq \arccos \left[ \frac{r_E}{r_E + h} \right]$$

$$T_e = 0 \quad \text{para} \quad |\rho| > \arccos \left[ \frac{r_E}{r_E + h} \right] \quad (5.1)$$

donde:

$T_e$  - período del eclipse.

$T_s$  - período de la órbita circular.

$\rho$  - ángulo entre el vector Sol-Tierra y el plano orbital del satélite (siendo en  $\rho = 0$ , el tiempo máximo de un eclipse).

$r_E$  - radio terrestre, ecuatorial:  $r_{Ee} = 6,378.14 \text{ Km}$ , polar:  $r_{Ep} = 6,356.75 \text{ Km}$ .

$h$  - altitud instantánea del satélite.

$\mu$  - cte. gravitacional,  $\mu = 398,600.5 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{s}^2$ .

$v_s$  y  $\omega_s$  - velocidad lineal y angular del satélite, respectivamente.

Desafortunadamente el gran número de ciclos de carga y descarga en las baterías disminuye su tiempo de vida y complica excesivamente el sistema térmico del artefacto, siendo necesario el uso tanto de técnicas de control pasivo (aislamiento por revestimiento y capas oscuras, y reflectores/radiadores ópticos) como de electrocalentadores controlados termoestáticamente y/o por comando.

Por otra parte, la plataforma satelital también variará para convenir a los requerimientos del arreglo solar y de las antenas, según el método de apuntamiento empleado, el cual puede ser:

- orientación por ejes paralelos - el eje del satélite es paralelo a la normal orbital, caso clásico de los satélites geoestacionarios.
- apuntamiento por nadir - uno de los ejes del satélite y las antenas de la cara nadir son dirigidas hacia el centro del área de cobertura y por lo tanto, los arreglos solares deben ser balanceados y apuntados hacia el Sol.
- apuntamiento por orientación solar - tanto el cuerpo del satélite como el arreglo solar son apuntados hacia el Sol mientras que las antenas son balanceadas y apuntadas hacia el área de cobertura.

### 5.2.3 Constelación satelital

Como se aprecia en la siguiente figura, la altitud del satélite define el ángulo de cobertura y en consecuencia los ángulos de vista del enlace (ec 5.3).

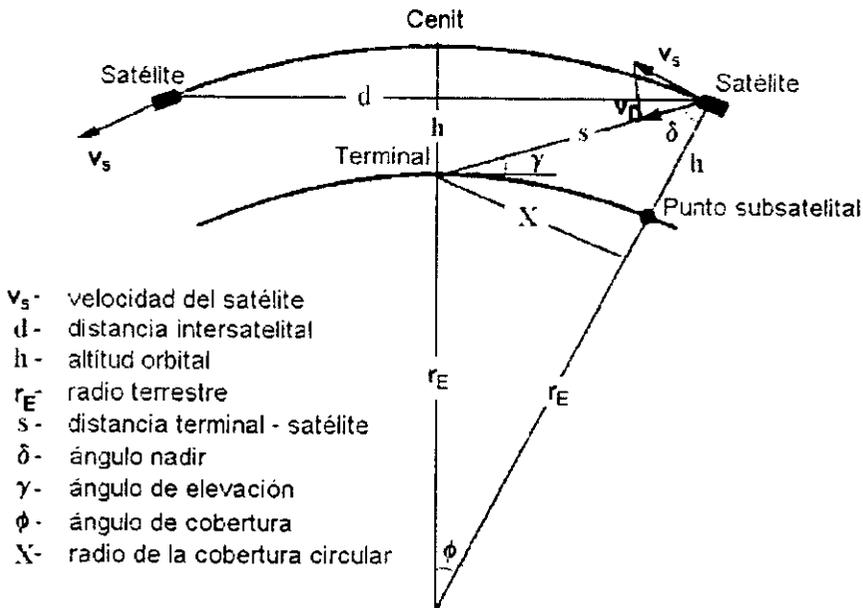


Figura 5.3 Sección de una órbita circular. El punto subsatelital es el punto sobre la superficie marcado por la línea que une al satélite y al centro del planeta.

$$s = \sqrt{r_E^2 + (r_E + h)^2 - 2r_E(r_E + h)\cos\phi} \quad \phi = \arccos \left[ \frac{r_E}{r_E + h} \cos\gamma \right] - \gamma$$

$$\gamma = \arccos \frac{(r_E + h)\sin\phi}{s} \quad z = \arcsen \left[ \frac{\sin L \cos l_s}{\sin\phi} \right]$$

$$\cos\phi = \cos L \cos l_s \cos l_t \sin l_s \sin l_t \quad (5.3)$$

donde:  $z$  - ángulo azimut (ángulo entre el norte y la trayectoria del satélite en el plano horizontal).

$L$  - longitud entre los meridianos del satélite y de la terminal.

$l_s$  y  $l_t$  - latitudes del satélite y de la terminal, respectivamente.

Por lo tanto, conforme el satélite orbite a una menor altitud éste disminuirá su huella o cobertura así como su periodo orbital (véase ec.5.2), como se indica en la siguiente tabla.

**Tabla 5.1** Parámetros de órbitas circulares con un ángulo de vista  $\gamma_x = 10^\circ$ .

Altitud orbital (Km)	Radio orbital (Km)	Período orbital	Velocidad tangencial (Km/s)	Radio del área de cobertura (Km)
200	5,556	1h28m	7.797	808
400	6.756	1h32m	7.681	1333
600	6.956	1h36m	7.569	1737
800	7.156	1h40m	7.463	2068
1,000	7.356	1h45m	7.361	2349
1,200	7.556	1h49m	7.263	2592
1,400	7.756	1h54m	7.168	2805
2,000	8.356	1h07m	6.906	3320
3,000	9.356	2h30m	6.527	3914
5,000	11.356	3h21m	5.924	4615
10,000	16.356	5h47m	4.936	5361
20,000	26.356	11h50m	3.889	5819
35,786	42,164	23h56m	3.075	6027

Como resultado del limitado campo de vista de los satélites LEO y MEO, los sistemas de cobertura global de este tipo, deben ser integrados por un significativo número de satélites en diferentes planos orbitales y organizados dentro de una constelación preferiblemente en fase <sup>1</sup>, en las cuales los satélites mantienen posiciones relativas constantes. Para establecer el número mínimo de artefactos en la constelación, es necesario considerar en el diseño del sistema los bordes de cobertura de los mismos ( $\phi_x$ ), definidos por el ángulo de elevación mínimo ( $\gamma_x$ ) de la siguiente manera:

$$\phi_x = \arccos \left[ \frac{r_E}{r_E + h} \cos \gamma_x \right] - \gamma_x \quad (5.4)$$

Sin embargo, dicha consideración no basta cuando se desea que el sistema satelital disponga cobertura continua, ya que en tal caso es inevitable el traslape entre las huellas de los satélites, siendo el área efectiva de cada huella equivale al hexágono inscrito dentro de ésta, el cual consta de seis triángulos isósceles esféricos, cada uno con un ángulo de  $60^\circ$  respecto al centro de la huella y dos ángulos ( $\chi$ ) idénticos respecto a la periferia de la misma (figura 5.4). Denotando a  $\xi$  como el exceso esférico de cada triángulo, es posible calcular el área de cobertura ( $A$ ) de cada hexágono (ec. 5.5) y por lo tanto conocer el número mínimo ( $n$ ) de satélites necesarios para la cobertura total de la superficie bajo la órbita (ec. 5.6). Posteriormente, para determinar el número de órbitas requerido en una cobertura global, basta considerar la cobertura satelital en el ecuador o en cualquier otro gran círculo.

$$\chi = \arctan \left[ \frac{\sqrt{3}}{\cos \phi_x} \right]; \quad \xi = 2\chi - \frac{2\pi}{3}; \quad A = 6r_E^2 \cdot \xi \quad (5.5)$$

$$n = \frac{4\pi \cdot r_E^2}{A} = \frac{\pi}{3\chi - \pi} \quad (5.6)$$

---

<sup>1</sup> Las constelaciones aleatorias evitan la necesidad de complejos sistemas de control orbital y por lo mismo pueden emplear satélites más sencillos, pero su eficiencia total es menor a la de una constelación en fase.

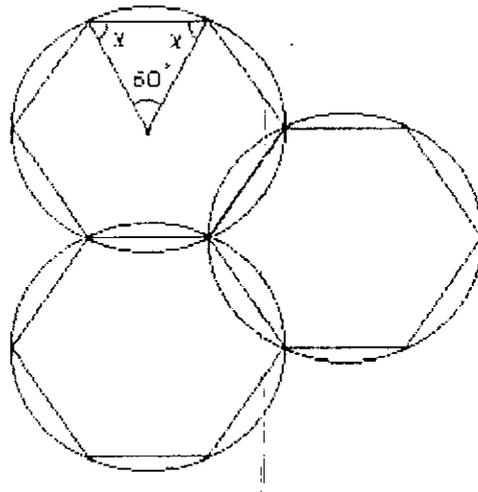


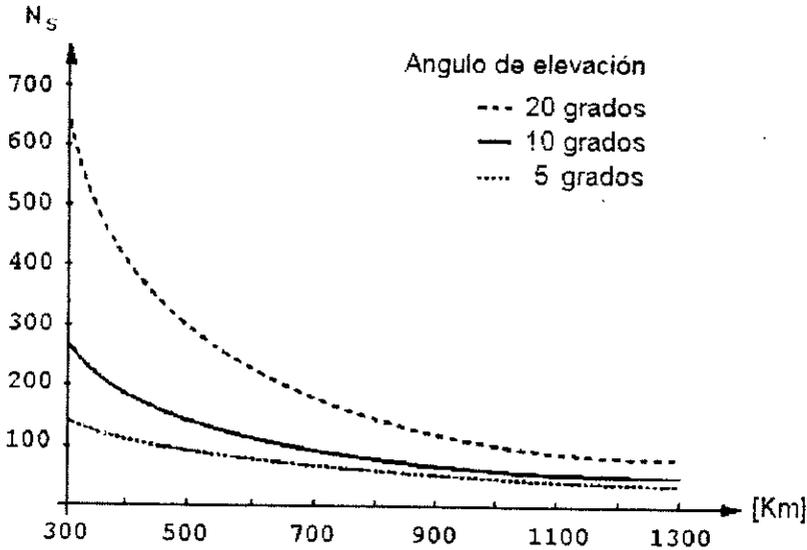
Figura 5.4 Hexágonos inscritos en la cobertura o huella satelital.

En el particular caso de constelaciones polares, los satélites experimentan menores perturbaciones pero la cobertura orbital continua (hexágonos) implica un gran número de satélites (ec. 5.7), los cuales congestionan la constelación al pasar sobre los polos terrestres, provocando un improductivo traslape en dichas zonas, cuando lo ideal sería que dicho efecto ocurriese en el área de mayor tráfico, esto es, en latitudes próximas a los 45° N. Para una constelación que utiliza órbitas polares circulares con coberturas sin traslape, el número de satélites equiespaciados por plano orbital ( $N_o$ ) y el número de planos equiespaciados ( $N_p$ ), mantienen las relaciones indicadas en las ecuaciones 5.8 (relaciones manifestadas en el citado libro de Michael J. Miller) e ilustradas en la figura 5.5.

$$n = \frac{2\pi}{\sqrt{3}\phi_x} \quad (5.7)$$

$$N_o = \frac{\pi}{\phi_x - \varepsilon}; \quad N_p = \frac{\pi - 2 \arccos[\cos \phi_x / \cos(\phi_x - \varepsilon)]}{\phi_x + \arccos[\cos \phi_x / \cos(\phi_x - \varepsilon)]} + 1; \quad (5.8)$$

donde:  $\varepsilon \cong \frac{(-\phi_x + \sqrt{\phi_x^2 + 6\phi_x \tan \phi_x})^2}{18 \tan \phi_x}$  (véase la ec. 5.4)



**Figura 5.5** Número y altitud de satélites LEO polares necesarios para tres diferentes ángulos de elevación.

En esta figura se aprecia como el número total de satélites en cada órbita se incrementa para evitar trayectorias de enlace de bajos ángulos de vista, típicamente sensibles al bloqueo por árboles, montes y construcciones del entorno. Este concepto resulta especialmente relevante tanto en el Antártico que no posee cobertura satelital GEO, como en otras zonas de elevada latitud, tales como Escandinavia, Alaska, norte de Asia y de Canadá, donde los satélites GEO presentan ángulos de elevación tan bajos que sus enlaces requieren márgenes de 20 a 30 dB para superar el bloqueo de la señal.

Finalmente, a causa del número de satélites que integran la constelación, la colocación de los mismos dentro de sus órbitas requeridas, representa gran parte de la inversión total del proyecto. Afortunadamente en el caso más alarmante de los sistemas LEO, dicho costo puede ser minimizado debido al tamaño de los artefactos, los cuales usualmente son lanzados en grupos (bases) a bordo de cohetes de menor dimensión y costo que los requeridos por satélites GEO, e incluso es viable el uso de lanzadores para satélites GEO estándar durante la fase de colocación inicial.

Respecto a la optima estrategia de lanzamiento en grupo, ésta favorece el despliegue de una base de satélites por plano orbital, ya que el cambiar a un satélite de un plano a otro implica un gasto significativo de combustible. Por la misma razón, para el reabastecimiento de satélites durante el tiempo de vida de la constelación conviene tener satélites de reserva en tierra listos para su despliegue (también implementados sobre una base por plano) que mantener orbitando n satélites de reserva en cada plano.

#### 5.2.4 Reuso de frecuencias

Como las terminales portátiles del usuario están limitadas por la apertura de la antena (ganancia), el ruido del receptor (preamplificador de bajo costo sin sistema de refrigeración) y la potencia RF de salida (consumo de potencia de la terminal, tanto por tamaño como por salud); la carga útil de los satélites de comunicación móvil debe proveer la máxima potencia posible. En base a esto y debido a que las bajas frecuencias (VHF, útiles en sistemas de mensajería de baja capacidad) presentan fluctuaciones a causa de la ionosfera y las más altas frecuencias (X y bandas superiores) sufren enormes pérdidas por lluvia, la banda L resulta ideal para la comunicación de voz, pues ofrece aceptables márgenes de atenuación; presenta la mejor opción de utilidad en capacidad, en el tamaño de la antena de la terminal y en el empleo de transmisores potentes de bajo costo; además, permite también el uso de circuitos integrados monolíticos de onda<sup>1</sup> bastante ligeros en los amplificadores de entrada y de salida distribuida de los transpondedores, restándole masa al satélite.

Desafortunadamente, dicha banda presenta congestión del espectro de frecuencias debido a la existencia de muchos sistemas terrestres de radio. Ante ésta desventaja, los sistemas satelitales MEO y principalmente LEO (poseen huellas bastante pequeñas) deben aprovechar al máximo su ancho de banda a través del reuso de frecuencias, el cual prescinde de la polarización ortogonal debido a los efectos de dispersión y de multitrayectoria (tipicos en los enlaces satélite-terminal) que impiden recurrir a el uso de la polarización lineal.

---

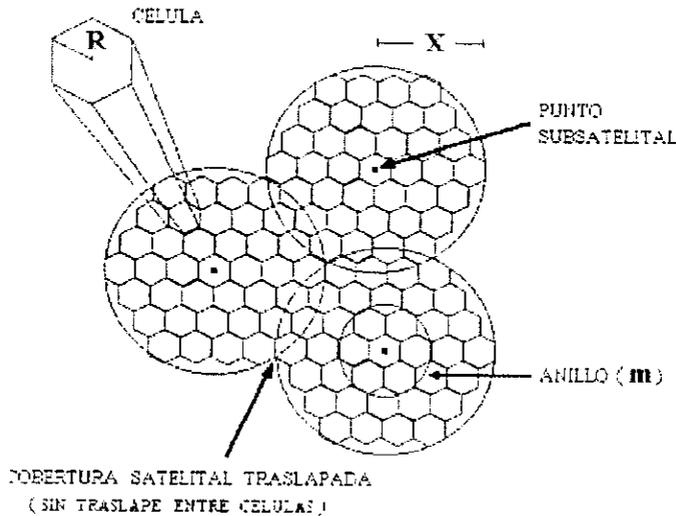
<sup>1</sup> Estos también resultan económicos cuando se tienen producciones en serie relativamente grandes, como es el caso de las constelaciones LEO.

En consecuencia, los satélites emplean antenas de haces múltiples capaces de dividir el área de cobertura (ec. 5.9) en  $M$  células hexagonales de radio  $R$  predefinido (ec. 5.10), debido a que el constante movimiento de los satélites evita que los radios de las células puedan ser elegidos en base a la distribución del tráfico de comunicación (figura 5.6).

$$\text{Radio de la cobertura proyectada} \quad X = r_E \operatorname{sen} \phi_A \quad (5.9)$$

$$M = 1 + 3m \cdot (m + 1); \quad R \cong \frac{2\pi \cdot r_E}{N_s (4m - \sqrt{3})} \cong \frac{2X}{(2m + 1)\sqrt{3}} \quad (5.10)$$

donde  $m$  es el número de anillos celulares por área de cobertura.



**Figura 5.6** Círculos de cobertura y células hexagonales formadas por una antena de apertura circular.

<sup>1</sup> Estas son arreglos en fase que presentan haces nulos en co-frecuencia sobre los haces adyacentes para minimizar así la interferencia. Tanto la formación de los haces como la conmutación y el barrido de los mismos, es posible mediante circuitos VLSI operados bajo control computarizado en unión con arreglos de SSPA, donde típicamente cada amplificador sirve a un único haz para evitar la saturación en potencia.

Además, como el medio de propagación, el ancho de banda y la linealidad del amplificador del canal, limitan en base a la tasa de bits erróneos (BER\*), la elección y el orden de la modulación (BPSK\*, QPSK\* y variantes) y de la codificación (FEC\*); existen otras alternativas posibles para incrementar el reuso de frecuencias, tales como la operación en banda angosta y en banda lateral única (SSB - Single Side Band), así como la operación por división en tiempo y por código en espectro disperso<sup>1</sup>. Este último, resulta particularmente útil como método de acceso, ya que a diferencia de los sistemas FDMA\*, una combinación de acceso múltiple de espectro disperso y acceso múltiple por división de código (SSMA\* / CDMA\*) provee alta eficiencia espectral con aceptable degradación durante incrementos en la carga de tráfico sin impedir el uso de un espectro compartido ni presentar significativa carga en los enlaces para la sincronización del sistema, como es el caso de los enlaces TDMA\*; y sin embargo, recurre a la transmisión en ráfagas para reducir la potencia de salida en los enlaces del satélite y mejorar la eficiencia de las redes LEO y MEO<sup>2</sup>.

No obstante, la eficiencia del reuso de frecuencias del satélite depende en gran medida del número de células dentro del área de cobertura, que a su vez varía con la altitud de la órbita, ésta determinan tanto la complejidad y las dimensiones de la antena (figura 5.7 y tabla 5.2) como el número de cambios automáticos del enlace hacia una célula satelital adyacente, en una frecuencia diferente (handoff)<sup>3</sup>; el cual también depende del tiempo de vista del satélite, factor relacionado a la velocidad relativa en la altitud orbital (figura 5.8).

---

<sup>1</sup> Las técnicas de espectro disperso son: Secuencia directa (DS) o operación pseudoruido, Salto no coherente en frecuencia (FH), Salto en tiempo (TH) y FH / DS híbrido. Consúltese el libro: Sklar, *Digital Communications*, Prentice Hall.

<sup>2</sup> Una red satelital de comunicación en ráfagas puede poseer:  
Arquitectura síncrona- (SS-TDMA), TDMA y espacio conmutado.  
(PRS)\*, Sistematización de paquetes pseudoaleatorios.  
Arquitectura no síncrona- Frecuencia celular múltiple.  
(TDRA)\*, Acceso aleatorio en el dominio del tiempo.  
Consúltese el capítulo 4 del citado libro de Michael J Miller.

<sup>3</sup> En contraste con los sistemas celulares terrestres, un sistema satelital MEO y en especial un sistema LEO, presenta movimientos de las células bastante rápidos respecto al movimiento de los usuarios.

\* Consúltese el glosario

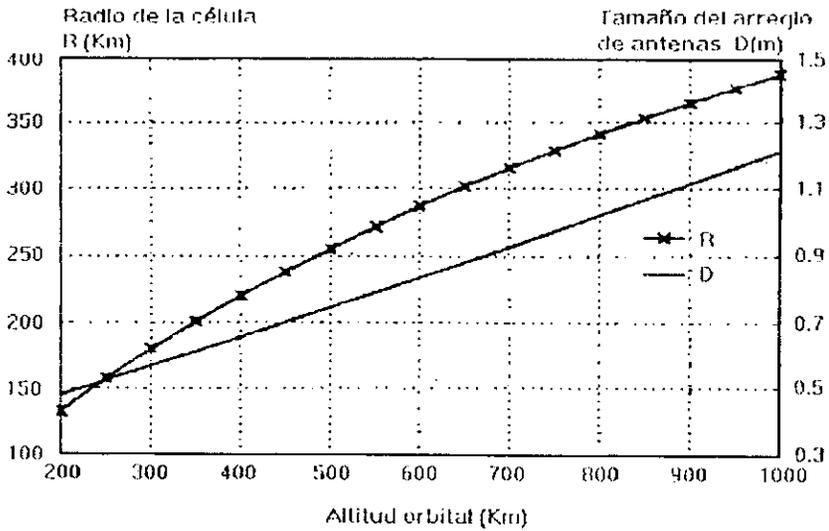


Figura 5.7 Tamaño de la célula y de la antena versus altitud del satélite.

Tabla 5.2 Número de células requeridas dentro de un área de cobertura para una antena de apertura circular y rectangular (véase la figura 5.6).

n	0	1	2	3	4	5	6	7
N (apertura circular)	1	7	19	37	61	91	127	169
N (apertura rectangular)	1	9	25	49	81	121	169	225

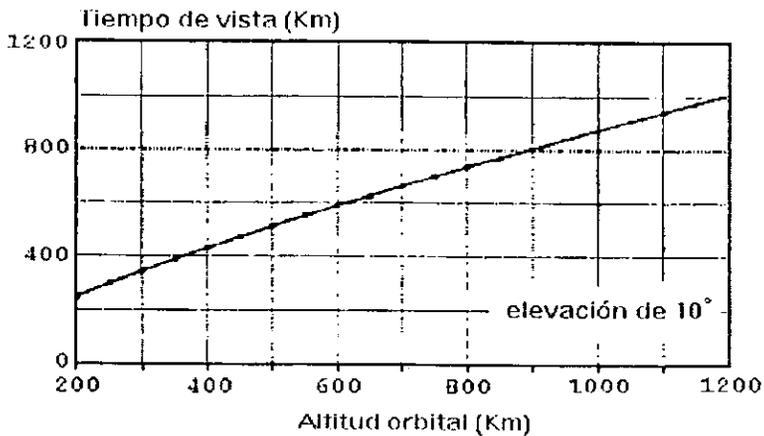


Figura 5.8 Relación del tiempo de vista vs altitud orbital.

### 5.2.5 Enlaces satelitales

Como nos muestra la figura 5.9, al reducir la distancia entre el satélite y la terminal (ec. 5.11), también se reduce el retardo por propagación ( $\tau_p$ ) y las pérdidas por espacio libre (ecs. 5.12), las cuales son la principal atenuación de un típico enlace LEO y MEO, como se aprecia en la tabla 5.3.

$$s_{max} = (r_E + h) \frac{\text{sen } \phi}{\text{cos } \gamma} = \sqrt{(r_E + h)^2 - r_E^2 \text{cos}^2 \gamma} - r_E \text{sen } \gamma \quad (5.11)$$

$$L_p = 20 \log \frac{4 \pi s f}{c} \quad \tau_p = s / c \quad (5.12)$$

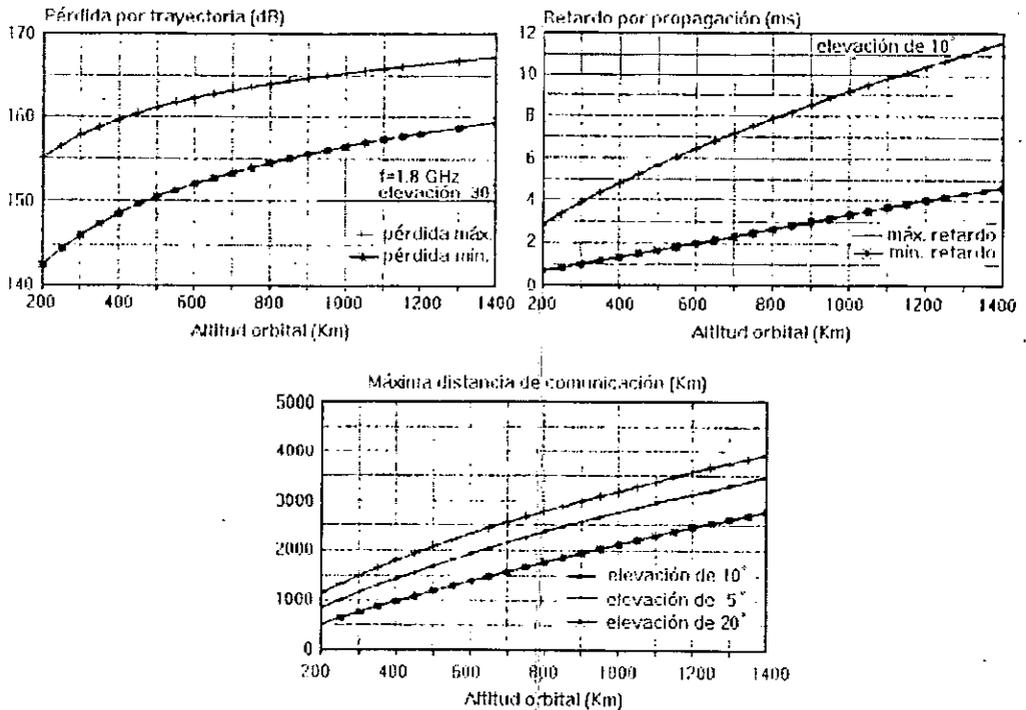


Figura 5.9 Comportamiento del retardo por propagación, de las pérdidas por espacio libre y de la distancia máxima del enlace, en función de la altitud orbital.

**Tabla 5.3** Estimación de un típico enlace para un sistema LEO. Este considera el uso de modulación digital QPSK sin código corrector de error y el uso de antenas reciprocas en el satélite para transmitir y recibir.

Enlace más desfavorable	Enlace T → S f = 1.6 GHz	Enlace S → T f = 1.6 GHz	Enlace ES → S f = 29.4 GHz	Enlace S → ES f = 20 GHz
Antena & Tx	1 dBi, 3.7 W	24.3 dBi, 3.5 W	56.3 dBi, 20 W	26.9 dBi, 1 W
Perdidas en ctos	0.7 dB	2.1 dB	1.3 dB	3.7 dB
Tx PIRE (dBW)	6	27.7	68	23.2
Lp (dB)	164.5	164.5	189.1	185.8
Perdidas atmos.	0.7	0.7	1.7	1.7
Antena & Rx	23.9dBi, 500K	3dBi, 250K	29.3dBi, 1295K	53dBi, 731K
Rx G/T (dB/K)	-3.1	-23.0	-1.8	+24.3
Cte. de Boltz.	228.6	228.6	228.6	228.6
C/No (dBHz)	53.1	53.1	75.7	75.7
Margen (dB)	13.2	15.0	28.3	18.0

Sin embargo, la reducción de la altitud también implica una velocidad mayor del satélite para conservar su órbita, misma que incrementa el efecto Doppler como se muestra en la tabla 5.4, el cual afecta a la comunicación según el tipo de modulación, las técnicas de multiplexaje y los métodos de acceso al satélite, dañando principalmente los enlaces digitales debido a la demodulación coherente que éstos requieren.

**Tabla 5.4** Parámetros de órbitas circulares con un ángulo de vista  $\gamma_x = 10^\circ$ .

Altitud orbital (Km)	Velocidad tangencial (Km/s)	Máximo valor Doppler (ppm)	Máx. Doppler f=1.6GHz (KHz)
400	7.681	23.7	38.0
600	7.569	22.7	36.4
800	7.463	21.8	34.9
1,000	7.361	20.9	33.5
1,200	7.263	20.1	32.2
1,400	7.168	19.3	30.9
2,000	6.906	17.3	27.7
3,000	6.527	14.6	23.4
5,000	5.924	11.0	17.6
10,000	4.936	6.5	10.4
20,000	3.889	3.4	5.5
35,786	3.075	~ 0	~ 0

Como los satélites LEO y MEO se desplazan a aproximadamente 7.5 y 5 Km/s, respectivamente, en relación a la superficie terrestre, y la rotación del planeta genera sobre los puntos de la superficie (y terminales estacionadas) movimientos de entre 0 Km/s en los polos y 0.46 Km/s en el ecuador; los enlaces de los usuarios en tierra presentan variación adicional en el corrimiento de frecuencia por efecto Doppler conforme el satélite pasa sobre éstos de acuerdo a la latitud y a la posición de la terminal dentro de la zona de cobertura satelital en movimiento (ec. 5.13). Dicho desplazamiento, adquiere un máximo valor positivo cuando el satélite aparece sobre el horizonte, después éste tiende continuamente hacia un valor mínimo absoluto hasta que el satélite se sitúa en el cenit de la terminal y finalmente alcanza un valor máximo negativo en el ángulo de elevación más bajo, antes de que el artefacto desaparezca en el horizonte opuesto.

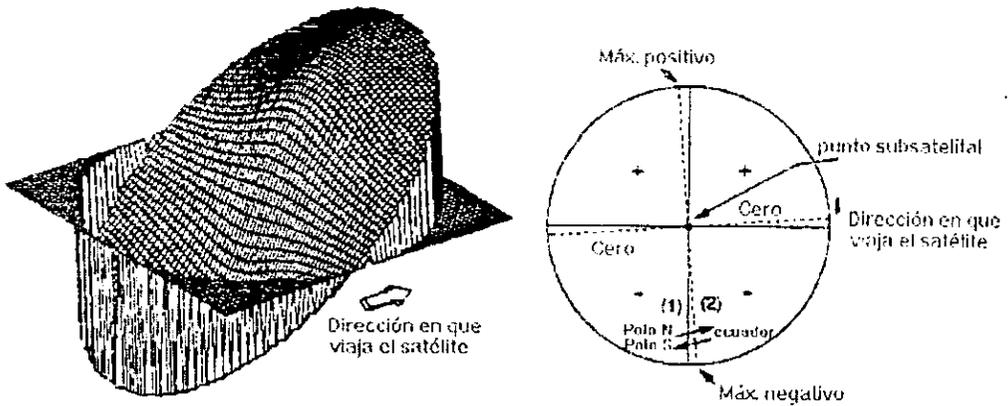
$$\Delta f_D = f \frac{v_D}{c} \quad (\text{véanse las ecs. 5.1})$$

$$v_D = \sqrt{\frac{\mu \cdot r_E}{(r_E + h)^3}} \cos \gamma \sin \psi - \frac{2\pi}{86164} r_E \cos l_t \cos \gamma \cos \psi \quad (5.13)$$

donde  $\psi$  es el ángulo entre la proyección de la línea satélite-terminal sobre el plano tangencial al punto subsatelital, y la tangente latitudinal en dicho punto.

De acuerdo a estas ecuaciones, el mínimo corrimiento Doppler (máximo valor absoluto) se presenta en el borde de la zona de cobertura de una terminal sobre el ecuador (ec. 5.14). Para enfatizar dicho concepto, en la figura 5.10 se presenta una visión en 3D del corrimiento Doppler y su pendulación dentro de la zona de cobertura de un común satélite LEO sobre el ecuador.

$$\psi = \psi_x = \arctan \left[ -\frac{43082}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{(r_E + h)^3}} \right] \quad (5.14)$$



**Figura 5.10** Dentro de una zona de cobertura hay una curva en forma de S (marcada como "cero" y una línea punteada en la figura) que atraviesa el punto subsatelite, sobre la cual todos los puntos tienen cero corrimiento Doppler. La misma es cruzada bajo un ángulo de  $90^\circ$  que obviamente contiene todos los puntos de máximo corrimiento Doppler. De esta manera, para un satélite sobre el polo, (1) son las curvas de máximo, mínimo y cero corrimiento Doppler, mientras que para un satélite sobre el ecuador, éstas son (2); siendo  $4^\circ$  la desviación máxima entre éstas.

Los métodos básicos para la compensación del efecto Doppler son: control de frecuencia de lazo cerrado terminal - satélite, precorrección en el lado receptor del enlace, y precorrección en el lado transmisor del enlace. El primero ofrece el control más preciso, pero implica equipo complicado, ya sea a bordo del satélite o dentro de las terminales, mientras que en los dos últimos el equipo es simple y no se instala en las terminales, pero introduce errores de recepción en la frecuencia dentro de una cobertura celular.

Aunque el corrimiento Doppler es un problema para las comunicaciones en órbita baja, éste puede ser una útil fuente de información si es usado en sistemas de localización de posición, basándose en la posición exacta del satélite y en el número de células para eliminar ambigüedad.

Otro factor importante para los enlaces satelitales convencionales es la Interferencia en co-canal con terminales terrestres de radio ( $I$ ) mientras el satélite está próximo al horizonte. En el caso de los satélites LEO, la distribución de probabilidad de interferencia para una localidad terrestre específica, puede ser determinada contabilizando la operación multisatelital del siguiente modelo matemático estadístico:

$$I = 20 \log \frac{c}{4\pi \cdot f \cdot s(t)} + La(t) + Lp(t) + G_T(t) + P_T + G_R(t) \quad (5.15)$$

donde los parámetros están en función del tiempo:

- $La$  - pérdidas atmosféricas y por desvanecimiento
- $GT$  - Ganancia del satélite en la dirección del receptor
- $GR$  - Ganancia del receptor en la dirección del satélite
- $PT$  - Potencia de transmisión del satélite

### 5.2.5.1 Enlaces cruzados ISL

Debido a que los satélites MEO y en especial los LEO, poseen pequeñas huellas de cobertura, la comunicación en tiempo real (necesaria en los servicios de comunicación interactiva, como la telefonía, las conferencias y otros) entre terminales de diferentes zonas de cobertura, requiere además de los convencionales enlaces satelitales con la terminal y con la estación terrena, el uso de enlaces cruzados que permitan tanto la transferencia de la comunicación como del tráfico pertinente a la sincronización de la constelación y a la definición óptima de la trayectoria de enlace<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Aunque para la definición de la trayectoria del enlace es posible el uso del método de inundación (un mensaje es enviado hacia la terminal en todas las rutas disponibles entre la fuente y el destino; éste es el método de menor eficiencia, pero resulta adecuado para constelaciones aleatorias) y el ruteo centralizado (preferido por las redes GEO por simple y rápido, éste método dispone de mapas centralizados de la posición de la terminal y decisiones de trayectoria, que reducen la confiabilidad del sistema e implican muchos canales de señalización), el ruteo distribuido (en éste, los mapas se encuentran almacenados en tierra o en nodos de la red satelital, creando menor tráfico de señalización en la red y mayor confiabilidad en el sistema) es el más adecuado para los sistemas de comunicación LEO y MEO debido a su dinámica estructura.

Aun cuando dichos enlaces pueden ser establecidos con base en tierra a través de fibra óptica, cable coaxial o repetidores de microonda, convienen los enlaces ISL e IOL (Inter-Orbital-Links) debido a que: no son afectados por la absorción atmosférica, reducen el retardo de comunicación al prescindir de un doble salto, minimizan la congestión del segmento satelital terrestre y los problemas a causa de la distribución de tráfico, evitan la necesidad de almacenamiento a bordo, reducen el costo total del sistema y seleccionan libremente la banda de frecuencias previendo casos de alta absorción atmosférica. Obviamente, los ISL implican dispositivos de procesamiento a bordo<sup>1</sup> para disponer de enlaces regenerativos, esto es, optimizar individualmente la velocidad de datos de los distintos enlaces y usar diferentes esquemas de modulación sobre los mismos.

Particularmente importante, resulta la flexibilidad de conectividad y cobertura que los ISL logran en las constelaciones de órbitas bajas funcionando como medios primarios o de respaldo en la transmisión de telemetría y comando del satélite, y muy en especial como enlace único con el sistema mientras los satélites pasan sobre grandes superficies oceánicas sin estación terrena a la vista, siendo a través de éstos, la transmisión del tráfico de algunos otros satélites.

Por ello, aun cuando puede variar la topología del ISL según la cantidad de tráfico y las distancias entre los satélites (ecs. 5.16)<sup>2</sup> para minimizar el tiempo de retardo y la congestión de tráfico, cada artefacto debe tener cuando menos cuatro ISL, típicamente de un mayor ancho de banda que los enlaces convencionales: dos hacia los satélites vecinos en el mismo plano y dos hacia los planos orbitales adyacentes (estos transportan la mayoría del tráfico por handoff y la señalización de la constelación), mismos que en base al retardo de propagación, deben ser orientados hacia el punto donde los satélites estarán en el momento de arribo de la señal<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> El procesamiento a bordo consiste de manera global, en la separación de etapas y/o circuitos, el procesamiento en banda base, la detección de errores, la compresión de datos, la temporización, la linearización digital, la ecualización de canales y la remodulación de la portadora.

<sup>2</sup> Para satélites co-planares, la distancia del ISL permanece constante, mientras que en los enlaces IOL la distancia varía entre su valor y una mitad del mismo.

<sup>3</sup> Aunque para satélites no geoestacionarios el ángulo de compensación implícito puede superar los 0.003. Para la mayoría de los ISL por microondas este es mucho menor al ángulo de apertura del haz estándar de 0.5. Sin embargo, en el caso de ISL ópticos donde la apertura angular del haz típico es del orden de 0.0003, deber tomarse algunas medidas para compensar dicha desviación.

El ISL no es interferido por la sombra de la Tierra si:

$$(r_E + h) \cos \phi - r_E > 0$$

El ISL no atraviesa la atmósfera de altura si:

$$(r_E + h) \cos \phi - (r_E + h_u) > 0$$

Máxima distancia de un ISL en órbitas circulares polares:

$$d = 2(r_E + h) \operatorname{sen} \left[ \frac{\pi}{N_s} \right] \quad (5.16)$$

Ya que las características del ISL, tales como la capacidad de comunicación, la precisión en el control de posición y la potencia requerida, entre otras, son parámetros de suma importancia en el desempeño del sistema, las tablas 5.4 - 5.6 resaltan grosso modo las principales diferencias entre las tres distintas tecnologías.

**Tabla 5.4** ISL por microondas vs ISL por ondas milimétricas

Frecuencia (GHz)	Banda (GHz)	Tipo de onda	Figura de ruido en el LNA (dB)	Potencia del TWTA (W)
22.55-23.55 (p)* 25.25-27.50 (s)* 32-33 (p)	23/32	microondas	3-4	150
54.25-58.2 (p) 59-64 (p)	60	microondas	4-5	75
116-182 (p)	120	ondas milimétricas	8	30
170-182 (p) 185-190 (p)	180	onda milimétricas	-	-

\* Radiofrecuencias asignadas para ISL sobre una base primaria (p) o secundaria (s).

**Tabla 5.5** ISL por microondas vs ISL por onda óptica

Enlace digital (d=4.300Km)	ISL por microondas	ISL por onda óptica
Frecuencia / long. de onda	32 GHz	0.85 $\mu$ m
Potencia de tx. media	10 dBW (10 W)	-17 DBW (50 mW)
Pérdida de transmisión	-2.4 dB	-7.3 dB
Ganancia en antena/telescopio	55 dBi ( $\phi = 1$ m)	119.5 dBi ( $\phi = 0.25$ m)
Pérdida por espacio libre	-195.2 dB	-276.1 dB
Ganancia en antena/telescopio	55 dBi ( $\phi = 1$ m)	119.5 dBi ( $\phi = 0.25$ m)
Pérdida por apuntamiento	-0.1 dB	-3.5 dB
Pérdida en el receptor	-2.0 dB	-4.0 dB
Potencia requerida en el receptor para un enlace de 65 Mbps y BER= $10^{-6}$	-87.5 dBW	-87.5 dBW
Margen del enlace	7.8 dB	18.6 dB

**Tabla 5.6** Ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías para ISL

ISL por ondas ópticas y milimétricas		ISL por microondas
Ventajas	Desventajas	Ventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Telescopios o Antenas pequeñas que reducen el tamaño y la masa del satélite.</li> <li>• Bajos niveles de potencia de salida y transmisores compactos.</li> <li>• Altas frecuencias de operación que permiten la disposición de amplios anchos de banda para comunicación.</li> <li>• Para ISL por onda óptica, la portadora es directamente modulada en banda base (señal de canales multiplexados) y, no existe interferencia con los sistemas de radio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los requerimientos para la alta calidad en el control de posición y apuntamiento de la antena implican equipo adicional.</li> <li>• En el caso de los ISL por ondas ópticas, además de las vibraciones mecánicas, los enlaces están sujetos a desgaseamientos e interferencias por fuentes ópticas como el Sol; mientras que, los transmisores y receptores laser, necesitan de un sistema de refrigeración activa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sencillos problemas a causa del apuntamiento de la antena.</li> <li>• Alta confiabilidad de los componentes.</li> <li>• Diseños ya comprobados</li> <li>• Bajos niveles en la figura de ruido del los receptores y de los transmisores de alta potencia.</li> <li>• Fácil filtrado en los canales de baja velocidad de datos.</li> </ul>

Finalmente, podemos concluir el presente capítulo, agrupando las principales características de los sistemas LEO y MEO, sin considerar casos particulares.

**Tabla 5.7** Principales ventajas y desventajas de los sistemas LEO

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los satélites orbitan cerca de la Tierra, minimizando el retardo por propagación y en especial las pérdidas por trayectoria, lo cual reduce los requerimientos de potencia del enlace y por lo tanto las dimensiones del satélite y de la terminal.</li> <li>• En base a su corta distancia, a su limitada cobertura y a la avanzada tecnología de reuso de frecuencias, estos satélites constituyen el sistema de mayor capacidad en la densidad de enlaces por área.</li> <li>• Aunque los satélites implican muy avanzada y costosa tecnología, la similitud y el número de los mismos requeridos por la constelación, permiten reducir los costos por unidad a un nivel imposible en cualquier otro sistema.</li> <li>• Para la colocación de los satélites es posible el uso de lanzadores más pequeños y económicos que los convencionales lanzadores tipo GEO y HEO. Además, dichos lanzamientos pueden ser en grupos por base orbital en base a la capacidad de los cohetes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A causa de la altitud existen constantes precesiones orbitales debido al campo gravitacional, lo cual limita el tiempo de vida útil de los satélites a uno 5 años aproximadamente.</li> <li>• Para proveer cobertura continua con adecuados ángulos de elevación, se requieren bastantes satélites en la constelación.</li> <li>• El efecto Doppler presenta grandes corrimientos a causa de velocidad con que se desplazan los satélites.</li> <li>• Debido a que la inclinación del enlace satelital varía drásticamente conforme el satélite pasa sobre el usuario, la antena a bordo del artefacto debe poseer un patrón de radiación adecuado y las terminales idealmente deben emplear un sistema de seguimiento hacia el satélite.</li> <li>• Como el período de visibilidad de cada satélite es sólo de algunos minutos, se requieren frecuentes cambios del enlace entre las células y entre los satélites.</li> <li>• La constelación orbital implica un complejo diseño en las estaciones terrenas de control, pues cada satélite debe estar correctamente en fase para evitar la posible congestión, lo cual implica un sofisticado sistema de rastreo, telemetría y comando.</li> </ul>

**Tabla 5.3** Principales ventajas y desventajas de los sistemas MEO respecto a los sistemas LEO.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• El número de satélites y la complejidad de la constelación es mucho menor, por lo que la implementación e implantación de un sistema MEO resulta más fácil y rápida.</li> <li>• Debido al menor número de maniobras de corrección orbital, los satélites tienen un tiempo mayor de vida útil (aprox. de 15 años) y por lo tanto la constelación requiere de un menor reabastecimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aunque el retardo no es un factor alarmante, la pérdida por trayectoria si lo es, por ello los satélites son de mayor dimensión y costo.</li> <li>• Debido a la alta radiación del entorno, los satélites suelen requerir de gruesas capas protectoras.</li> <li>• Actualmente está en cuestión, la viabilidad tecnológica de las antenas de múltiples haces puntuales para un gran número de haces (de 100 o más).</li> </ul>

## 6

**SISTEMAS DE ÓRBITAS BAJAS E INTERMEDIAS  
DEL SIGLO XXI**

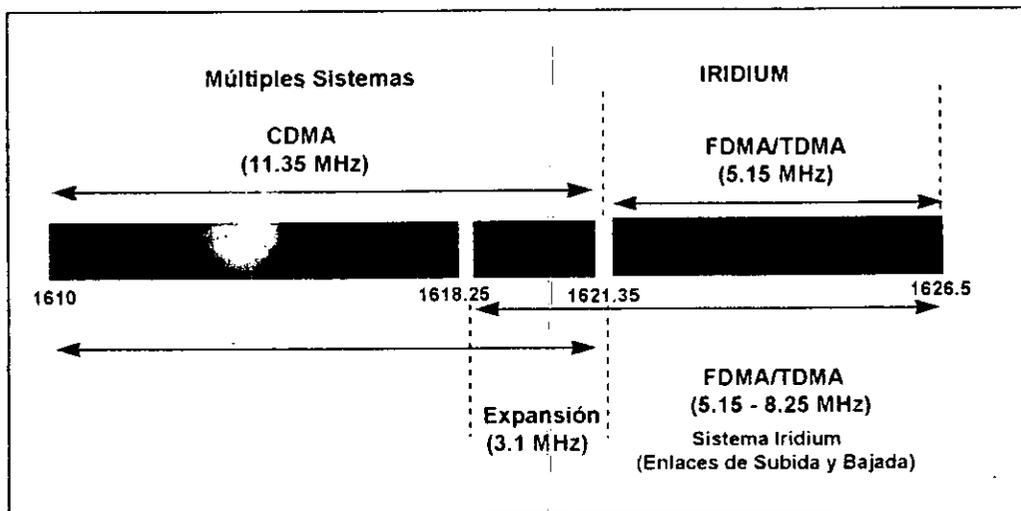
El auge de la telefonía celular dejó en claro la importancia de la telefonía móvil, la trascendencia de la portabilidad de la unidad de comunicación y sobre todo la problemática de una limitada cobertura en las actividades del usuario. Por tal motivo, muchas empresas de comunicación se dieron a la tarea de estudiar detenidamente las necesidades esenciales y optativas de los usuarios con el afán de implementar sistemas de comunicación satelital que no sólo complementaran y en otros casos sustituyeran a los servicios de comunicación móvil existentes, sino que también atendieran las principales tendencias de comunicación como el fax y otras transmisiones de datos.

Después de analizar los costos, la capacidad potencial del mercado y los riesgos técnicos y tecnológicos que la portabilidad demandada por el usuario implicaba, algunas cuantas empresas decidieron proveer relativamente alta capacidad de comunicación a través de terminales moderadamente pequeñas atendidas por sistemas geostacionarios (Terminales portátiles C y Mini-M de Inmarsat) o bien elaborar pequeños receptores satelitales para el uso exclusivo de radiomensajería (Terminales E y D de Inmarsat), sin embargo, la gran mayoría decidió acercar los satélites a las terminales en órbitas MEO y LEO, constituyendo un salto significativo en la tendencia hacia la comunicación personal global. Por tal razón, el presente es vital conocer la configuración de los sistemas MEO y LEO más avanzados a la fecha.

## 6.1 PLAN DEL ESPECTRO COMPARTIDO EN BANDA L

En virtud de la necesaria uniformidad del espectro de frecuencias a nivel mundial, la U.I.T. asignó las bandas de 1.6/1.5 GHz, 1.6/2.4 GHz y alrededor de los 2 GHz (ésta última banda entrará en vigor el 1º de enero del año 2000) para los enlaces de los sistemas móviles satelitales no geoestacionarios con las terminales del usuario.

Para el caso particular de los grandes sistemas satelitales de órbita baja (big LEOS), la U.I.T. ha dispuesto el rango de 1610.0 a 1626.5 MHz. El plan propuesto consiste en asignar un total de 11.35 MHz en la banda de 1610.0 - 1621.35 MHz para los proyectos autorizados implementados con tecnología CDMA (Acceso Múltiple por División de Código), mientras que para los sistemas con tecnología FDMA/TDMA se asignó un total de 5.15 MHz en el rango de frecuencias de 1621.35 - 1626.5 MHz. Las reglas consisten en que si solamente un sistema tipo CDMA es implantado, el plan propuesto asignaría hasta 8.25 MHz en la banda de 1610.0 - 1618.25, dejando despejados los 3.15 MHz de espectro disponible para posibles reasignaciones a sistemas con tecnología FDMA/TDMA o bien para otros nuevos sistemas, como se muestra a continuación :



**Figura 6.1** Asignación del espectro radioeléctrico en la banda de 1610-1626.5 MHz para los servicios MSS de sistemas LEO. (Cortesía de IRIDIUM LLC.)

## 6.2 SISTEMAS EN ORBITAS INTERMEDIAS

### 6.2.1 ICO (Intermediate Circular Orbit)

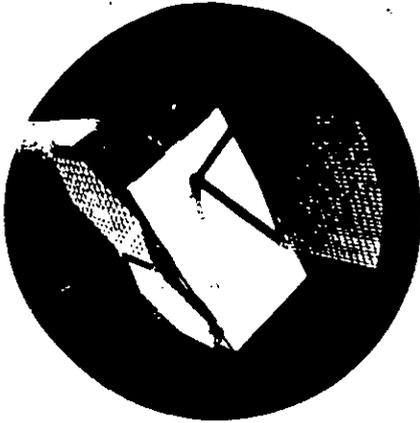
ICO Global Communications fue establecida en enero de 1995 como una empresa privada dedicada a la implementación e implantación del anteproyecto ICO presentado por el grupo de especialistas "Proyecto-21" de Inmarsat. Siguiendo la tendencia empresarial de dicho consorcio, ICO reúne a 47 inversionistas que aportan un capital que asciende a \$1500 millones de dólares USA, además de su experiencia y conocimientos exclusivos (bajo contrato), destacando entre éstos la amplia participación de Inmarsat International Communications.

#### 6.2.1.1 Configuración espacial

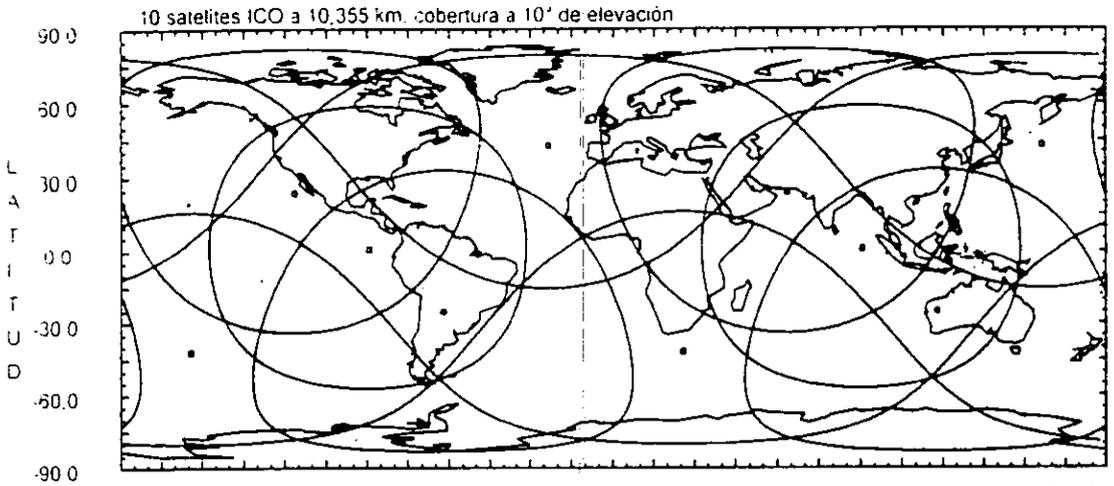
Alojados a 10,355 Km de altitud, los satélites ICO completan su órbita en un período de 6 hrs y presentan un retardo por propagación menor a 200 ms en enlaces unidireccionales. La constelación satelital del sistema (figura 6.2) está integrada por 10 satélites activos y dos más de reserva, sobre dos planos ortogonales a 45° del ecuador (5 satélites activos y uno de reserva en cada plano), los cuales aseguran cuando menos una cobertura dual para ángulos de baja elevación, debido a que cada satélite cubrirá aproximadamente un 30 % de la superficie terrestre y los planos orbitales facilitan enlaces con ángulos de elevación promedio de 40° a 50° en todo el planeta. De esta manera, generalmente cerca del 70% del campo visual de cada satélite estará traslapado por la cobertura de otros satélites de la constelación, como se muestra en la figura 6.3.

---

Actualmente ICO tiene oficinas en Londres y en Los Angeles, sin embargo próximamente se instalarán otras más en Africa, Asia Pacífico, China, Europa, India, Medio Oriente, Federación Rusa, América del Sur y Estados Unidos.



**Figura 6.2** Constelación satelital del sistema ICO. (Cortesía de ICO Global Communications.)



**Figura 6.3** Vista instantánea de la cobertura mundial del sistema ICO para un ángulo de elevación de 10 grados. (Cortesía de ICO Global Communications.)

Respetando lo convenido por la WRC-95, los satélites ICO están diseñados para operar en las bandas de 1980-2010 MHz y 2170-2200 MHz sobre los enlaces del usuario y en las bandas de 5150-5250 MHz y 6975-7075 MHz para los enlaces con la red del sistema. Así mismo, los artefactos disponen de tecnología digital en su carga útil para realizar de manera flexible funciones como la distribución de canales (reuso de frecuencias) y la generación de haces, haciendo ajustable la atribución de la capacidad total de los 30 MHz. Además, para una mayor protección contra la intermodulación, los satélites emplean un arreglo de antenas para transmisión y otro para recepción, éstos con una apertura mínima de dos metros radiarán los 163 haces del satélite, los cuales se proyectarán con un margen de potencia promedio de 10 dB para enlaces de 40° a 50° de elevación<sup>1</sup>.

Actualmente, dichos satélites están siendo construidos por Hughes Space & Communications International (figura 6.4), en base al contrato convenido con ICO en 1995, en el cual se estableció como plataforma satelital la cadena de producción de satélites geoestacionarios conforme a norma HS601, pero obviamente con sistemas de actitud y control adecuados a los requisitos particulares de ICO así como el uso de células de arseniuro de galio en el sistema de paneles solares <sup>2</sup>, a fin de que la potencia generada pueda exceder los 8,700 W hasta el termino de su vida útil, estimado en 12 años.

En contraste a los convencionales satélites HS601, los satélites ICO harán posible una cierta simplificación a la norma, pues debido a que su masa es menor a los 2600 Kg., éstos podrán ser transportados (durante un período de 20 meses a partir de 1988) en lanzadores de capacidad múltiple (cohetes Atlas IIA, Delta III, Protón y Zenit Sea Launch) y colocados directamente en su órbita circular correspondiente sin el uso de algún motor de apogeo.

---

<sup>1</sup> El margen de potencia para usuarios situados debajo del satélite oscila entre 10 y 11 dB, y poco más de 8 dB para enlaces a 10° elevación.

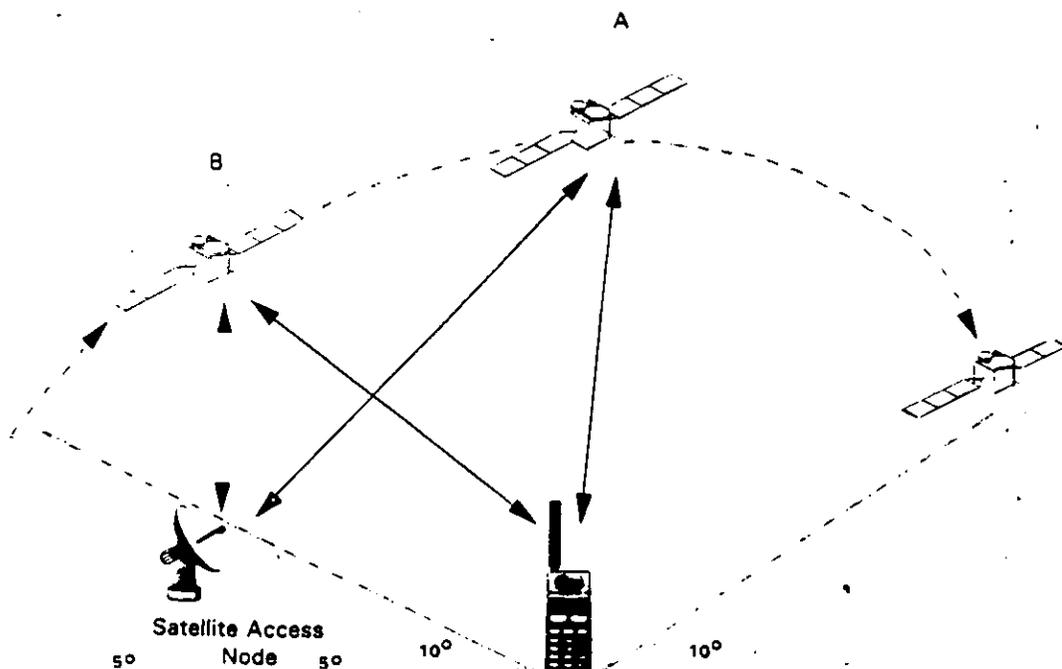
<sup>2</sup> En relación con las celdas de silicio, las celdas de arseniuro de galio duplican la relación potencia / masa, presentan mayor resistencia a la radiación y una menor caída en la potencia de salida durante incrementos de temperatura.



**Figura 6.4** Técnicos de Hughes integran el arreglo de antenas de un satélite del sistema ICO. (Cortesía de ICO Global Communications.)

### 6.2.1.2 ICONET

El diseño, la construcción e instalación de ICONET, la red terrestre del sistema ICO, ha estado a cargo de NEC Corporation, Hughes Network Systems y Ericsson desde 1996. A través de ésta son administrados los recursos de los satélites de la constelación, los cuales podrán dirigir el tráfico de comunicación de las terminales situadas a un ángulo de elevación mayor a los  $10^\circ$ , hacia alguno de los doce nodos de acceso al satélite o SANs (Satellite Access Nodes) de ICONET, que estén en línea de vista con el satélite en cuestión a un ángulo de elevación mayor a los  $5^\circ$  (típicamente estarán a la vista entre 2 y 4 nodos simultáneamente). Así, cuando el desplazamiento del satélite rebasa el límite de alguno de estos parámetros, el SAN transmitirá la señal a otro satélite más apropiado dentro del campo visual del usuario a fin de no interrumpir la comunicación y establecer el enlace más eficiente y de mayor duración posible (figura 6.5).



**Figura 6.5** Cambio del enlace del usuario, de un satélite a otro. (Cortesía de ICO Global Communications.)

Dichos nodos, estarán situados en Australia, Brasil, Chile, China, Alemania, India, Indonesia, Corea, México, Sudáfrica, Emiratos Arabes Unidos y en los Estados Unidos de Norteamérica, y básicamente contendrán los siguientes tres elementos <sup>1</sup>:

- cinco antenas con el equipo conexo necesario para comunicarse con los satélites.
- un conmutador para encaminar el tráfico entre ICONET y las estaciones de interconexión.
- bases de datos para la gestión de la red móvil.

<sup>1</sup> Seis de los SANs tendrán equipo adicional para control satelital y otro más podrá monitorear al total de la constelación satelital. ICO será propietario del equipo y diseño de los SANs, pero su instalación y mantenimiento será por contrato.

De acuerdo a la terminología GSM (Global Standard for Mobile Communications) estas últimas bases son un registro de posición de visitante (VLR-Visitor Location Register) que forma una base de datos que contiene pormenores de las terminales conectadas en ese momento a los SAN, y otro registro compartido de posiciones propias (HLR-Home Location Register) que contiene la información sobre todos los usuarios del sistema <sup>1</sup>.

En base a lo anterior, al encender la terminal está envía una señal vía satélite que llega a los SAN, donde se verifica la información sobre el usuario (HLR y VLR) y se autoriza el acceso al sistema. Posteriormente, el SAN registra la llamada en su VLR y consulta el HLR para proceder a enrutar la conexión (a través de ICONET) hacia el SAN más cercano al receptor (este también registra la llamada en su VLR), para finalmente completar la llamada por enlace satelital (Figura 6.6).

Respecto a las principales funciones de ICONET. Además de enrutar las llamadas terrestres hacia el SAN que esté en las mejores condiciones de atender la llamada, y de suministrar un canal para distintos mensajes de señalización e instrucciones acerca del funcionamiento del sistema; se suma al sistema una función de gestión que en la medida de lo posible seguirá las normas celulares digitales existentes (como el GSM) para facilitar la comunicación con redes terrestres públicas (PSTN, PSDN y PLMN) y privadas autorizadas, mediante estaciones de interconexión o Gateways (GW) de estos terceros <sup>2</sup>, las cuales pueden ser unidades especiales individuales o bien una función adicional de conmutadores ya existentes, para hacer más flexible tanto la atribución del tráfico como el encaminamiento del tráfico secundario.

---

<sup>1</sup> Aun cuando se prevé que un solo HLR pueda atender a todo el sistema, debido a las prácticas comerciales y por motivos de seguridad y de protección, la función del HLR deberá dividirse en una serie de unidades independientes, donde cualquier SAN podrá acceder a la totalidad de las mismas.

<sup>2</sup> Puesto que no existe un límite técnico predeterminado en cuanto al número de estaciones de conmutación que pueda incluir el sistema, la ubicación de estas dependerá de la proximidad del mercado y del acceso a los conmutadores existentes de las PSTN, PSDN o PLMN.

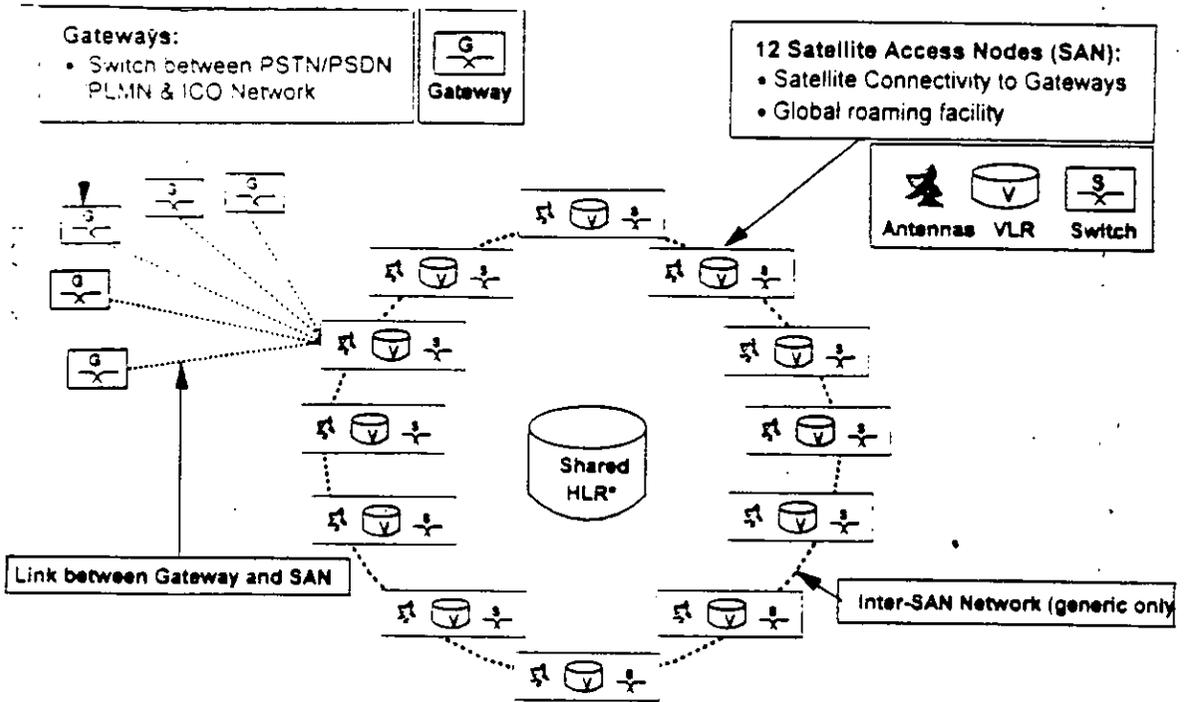


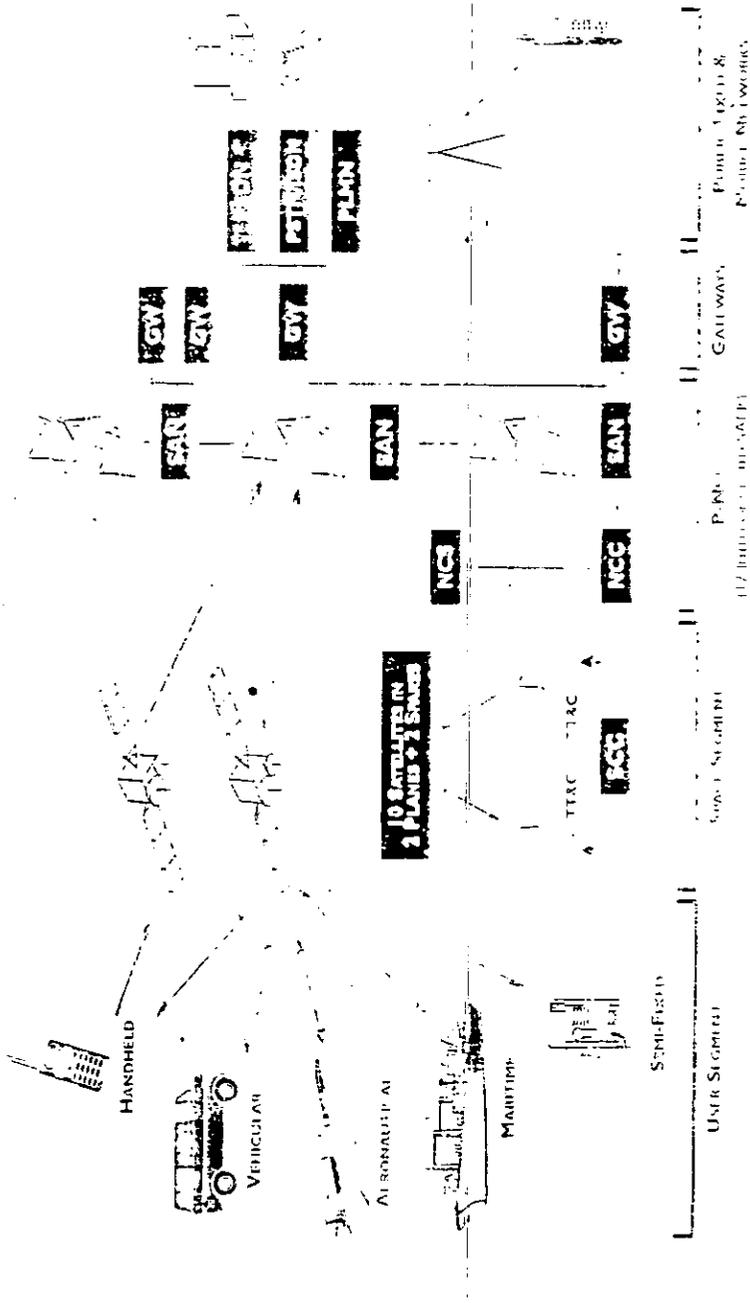
Figura 6.6 Configuración de ICONET. (Cortesía de ICO Global Communications.)

En cuanto al control global del sistema (figura 6.7), ICO tendrá en funcionamiento aproximadamente cinco centros de control satelital (SCC - Satellite Control Center) que en primera instancia atenderán el lanzamiento y el despliegue de los satélites, y que posteriormente se enfocarán a las tareas de monitoreo ajuste y/o realineación (en caso de falla de algún satélite) orbital a fin de mantener la configuración establecida. Estos también controlarán el estado general de los satélites, pues recibirán instrucciones directas de las estaciones de control de red (NCS - Network Control Satation) una vez que hayan transmitido los datos recopilados sobre el suministro de temperatura, de estabilidad y de otras características funcionales previstas (algunas funciones podrán realizarse a través de los SAN).

Por su parte las NCS encargadas de procesos como la determinación de la reconfiguración de las frecuencias entre los haces de enlace de conexión y la óptima atribución posible de los canales entre los haces estrechos de tráfico intenso y moderado, serán dirigidas por el centro de control de la red (NCC - Network Control Center)

# ICO SYSTEM

## OVERALL CONFIGURATION



**Figura 6.7** Configuración global del sistema ICO. En esta se aprecia como el centro de control de la red (NCC) dirigirá y controlará todo el sistema a través de las estaciones de control de red (NCS), las cuales a su vez emplearán los centros de control satelital (SCC) y los nodos de acceso al satélite (SAN) para controlar los enlaces de los transpondedores con las antenas de los satélites. (Cortés de ICO Global Communications.)

### 6.2.1.3 Terminales y servicios

Desde 1996, ICO aceptó a Wavecom de Francia como socio para las referencias técnicas de la terminal del usuario y a DVSI como un proveedor de los dispositivos analizadores y codificadores de voz (vocoder). Así mismo, firmó acuerdos con varios proveedores de terminales (Ericsson, NEC, Mitsubishi, Panasonic y Samsung) para el diseño e implementación de las terminales del sistema, las cuales en su mayoría serán pequeñas con capacidad dual (celular/satélite) y características opcionales como tarjetas con memoria (SIMs), puertos de acceso externo y memoria interna intermedia para servicios de comunicación de datos, transmisión de mensajes y facsímil (figura 6.8).



**Figura 6.8** Previendo las prescripciones de seguridad respecto a la radiación de frecuencias radioeléctricas, la potencia media transmitida comúnmente en condiciones de servicio no excederá de 0.25 W, cuando los actuales teléfonos celulares suelen operar entre los 0.25 y 0.6 W. El precio de los convencionales teléfonos dual de ICO será de aproximadamente \$1,000 dlls USA cuando se introduzca el servicio.(Cortesía de ICO Global Communications.)

Aunque convencionalmente, las terminales se asemejarán bastante en tamaño, apariencia y calidad del servicio de telefonía a los actuales teléfonos celulares de bolsillo (véase la figura 117), existirá una amplia gama de terminales móviles aeronáuticas, marítimas, y para vehículos terrestres, así como terminales semifijas y fijas (cabinas telefónicas en zonas rurales y servicios telefónicos públicos) en las cuales obviamente, podrán emplearse antenas de alta ganancia y/o potencia de transmisión superior a las convencionales terminales portátiles de ICO, para incrementar la velocidad binaria de transmisión.

En cuanto al servicio, ICO proveerá una disponibilidad promedio (probabilidad de que se pueda realizar una llamada en cualquier instante) de más del 90% en llamadas de dos minutos de duración (sin interrupción) en medios rurales y suburbanos al aire libre, mediante un margen de potencia de enlace de unos 7 dB con diversidad de trayecto y de 16 dB sin diversidad de trayecto. Así mismo, dada la distribución y el volumen de tráfico previstos, la atribución del espectro necesaria para cada dirección del enlace de servicio será de aproximadamente 10 MHz, por lo que cada satélite del sistema está proyectado para atender como mínimo 4,500 canales telefónicos distribuidos en aproximadamente 750 frecuencias portadoras mediante tecnología TDMA, a fin de integrar multicanales en cada onda portadora<sup>1</sup>. De esta manera, la capacidad de los distintos satélites es tal que la constelación podrá atender por lo menos 2,400 millones de minutos telefónicos por año, partiendo de un modelo de distribución de tráfico típico con puntos de gran demanda<sup>2</sup>, el cual incluirá desde el momento de su implantación, tanto el tráfico de los usuarios locales y regionales (constituido por los abonados de las PLMN existentes que pondrán a disposición este servicio de manera opcional) como el de los usuarios móviles de ICO a nivel mundial.

---

<sup>1</sup> Esta tecnología de acceso fue seleccionada en base a que tiene mayor capacidad para atender el tráfico y requiere prescripciones técnicas menos rigurosas, además de estar menos sujeta a interrupciones de llamadas como resultado de interferencias.

<sup>2</sup> Para facilitar aún más el tráfico, ICO ha previsto una reserva de capacidad fuera de los puntos de gran demanda.

## 6.2.2 ODYSSEY

A principios de 1991, TRW Space & Electronics Group patentó en Estados Unidos la aplicación de un sistema satelital para telefonía móvil celular, para el cual posteriormente solicitó ante la FCC licencia para construcción y operación. Ante este importante hecho, TRW fue invitado por Inmarsat para participar en un arduo estudio sobre dicha tecnología, el cual culminó en otoño de 1993.

A partir de dicha fecha, Inmarsat encausó los resultados obtenidos para la creación de un sistema satelital celular bajo la dirección de "Proyecto 21", mientras que TRW se allegó de 11 socios para la fundación de Odyssey Telecommunications International Inc. (OTI), organización encargada de operar el sistema Odyssey, la cual acordaría bajo contrato con TRW la implementación e implantación total de dicho sistema.

Fue hasta enero de 1995 cuando Inmarsat anunció la puesta en marcha del desarrollo de su sistema ICO (sucesor de Proyecto 21) basado en los estudios de TRW, a través de un consorcio independiente (ICO Global Communications). Esta actitud según TRW violaba el acuerdo previo establecido con Inmarsat, pues la aportación de TRW podría ser empleada sólo para proyectos propios de Inmarsat. Como consecuencia, TRW demandó la actitud de Inmarsat y solicitó en los Estados Unidos las patentes pertinentes a la invención de dicho sistema de órbita media y al desarrollo del sistema de "cobertura directa" que emplearían los satélites Odyssey para mejorar la eficiencia de la cobertura.

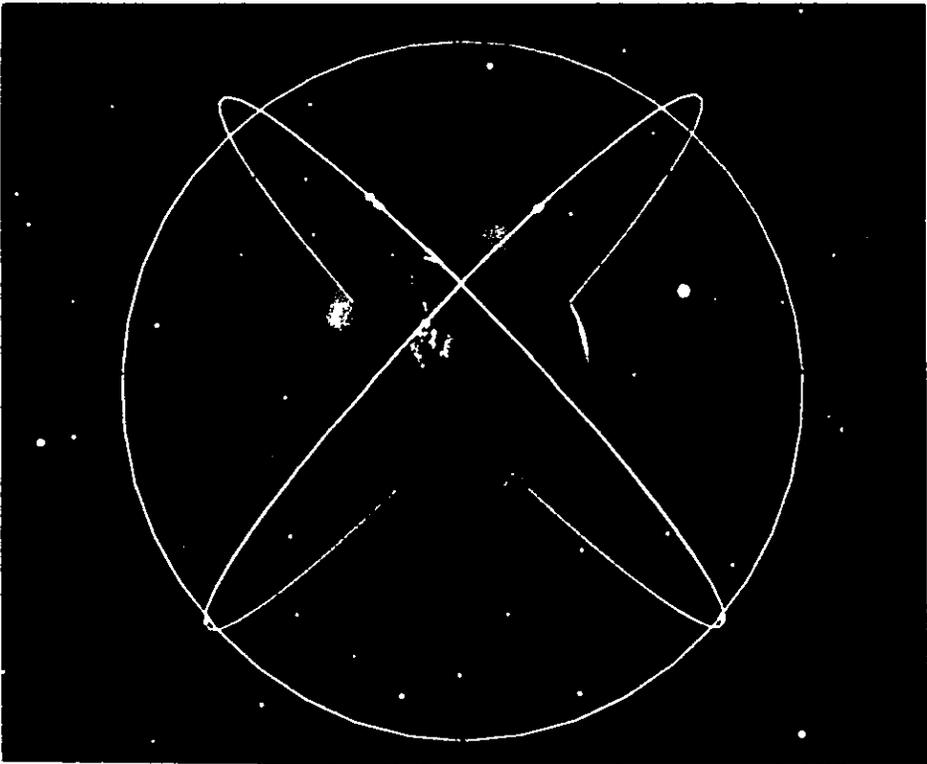
Aunque dichas patentes fueron concedidas en julio y agosto del año en cuestión, más tarde la primera de ellas no fue aceptada en Europa, orillando a TRW hacia un difícil enfrentamiento ante un consorcio bastante fuerte. Así, después de varios problemas financieros, Odyssey Telecommunications International Inc. decidió dar marcha atrás a la implementación de su sistema, negociando un tratado bilateral con ICO Global Communications, en el cual este último cederá un pequeño porcentaje de las ganancias del sistema, mientras que OTI brindará bajo contrato, los resultados de sus investigaciones y diseños exclusivos del sistema.

No obstante que Odyssey ya no será implementado, sus características representan gran interés para el análisis de futuras implementaciones del sistema ICO, por tal razón, a continuación se describen brevemente las atribuciones particulares de dicho sistema (tabla 6.1).

**Tabla 6.1** Datos técnicos del sistema Odyssey. (Cortesía de Odyssey Telecommunications International Inc.)

<b>Segmento espacial</b>	<b>Servicios</b>
12 satélites que orbitan a 10,354 Km de altitud sobre 3 planos inclinados de 50°.	Telefonía, Fax, Datos digitales, y mensajes cortos
<b>Especificaciones de los satélites</b>	<b>Sistema terrestre</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 61 haces por satélite</li> <li>• Asignación dinámica de frecuencias y potencia en cada haz</li> <li>• Capacidad de cobertura dirigida</li> <li>• 15 años de vida útil</li> <li>• peso- seco: 2210 Kg, humedo: 5155 Kg</li> <li>• potencia DC: 6200 watts</li> <li>• Antena rx. de 90 elementos radiantes</li> <li>• Antena tx. de 85 elementos radiantes</li> <li>• 3 antenas de reflector para enlaces Ka</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema compatible con GSM</li> <li>• 7 OES interconectadas por fibra óptica, formando un red WAN multi-anillo</li> <li>• SOC principal y un respaldo.</li> <li>• Gateways (GW) interconectados con la red de fibra óptica rentada y con PSTNs.</li> <li>• Señalización CDMA, terminal - OES</li> <li>• Señalización GSM &amp; SS7 OES - GW</li> </ul>
<b>Entlaces de comunicación</b>	<b>Terminales</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• enlaces con las terminales: subida: 1610.0 - 1626.5 MHz (L) bajada: 2483.5 - 2500.0 MHz (S)</li> <li>• enlaces con las estaciones terrenas: subida: 29.1 - 29.4 GHz (Ka) bajada: 19.3 - 19.6 GHz (Ka)</li> <li>• Licenciatario por la FCC en enero 1995</li> <li>• Códigos internacionales: 8812 y 8813</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unidades portátiles y fijas con operación dual o sólo bajo el sistema odyssey.</li> <li>• Comunicaciones full duplex de voz codificada a 4.2 Kbps</li> <li>• Optimización automática del nivel de la señal</li> <li>• Compatibilidad con tarjetas SIM</li> <li>• Pantalla alfanumérica</li> <li>• Capacidad para servicios GSM</li> </ul>
<b>Terminales portátiles</b>	<b>Terminales fijas</b>
<p>Peso y tamaño ~ teléfonos GSM 60 minutos en servicio y 24 hr. en stanby Potencia promedio: 0.2 watts Tasa de datos: 2.4 Kbps Precio esperado: US \$500 - \$700</p>	<p>Antenas externas Tasa de datos: superior a 64 Kbps Potencia-modo voz: 0.05 watts modo datos (9.6 Kbps): 0.2 watts Batería: compatible con fuentes solares Precio esperado: US \$700 - \$1,000</p>

Odyssey, un proyecto de \$3,200 millones dls USD planeaba iniciar operaciones hacia principios del año 2001. La constelación espacial del sistema estaría formada de 12 satélites (figura 6.9) que orbitarían a 10,354 Km sobre tres órbitas circulares de 50 grados de inclinación (4 satélites en cada plano). Dicha constelación aseguraría cuando menos en las áreas terrestres pobladas (excepto las zonas polares) una constante cobertura global simple con ángulos de elevación mayores a 20 grados, y una cobertura dual en un 88% del tiempo para minimizar las posibles obstrucciones, pues aunque cada satélite estaría visible en una región por casi 2 horas, sólo serían usados durante los intervalos en los que estos presentarían enlaces con ángulos de elevación de 45 a 55 grados (típicamente durante intervalos de 60 a 90 minutos).



**Figura 6.9** Constelación satelital del sistema Odyssey. (Cortesía de Odyssey Telecommunications International Inc.)

Como se aprecia en la figura 6.10, las antenas para los enlaces de alimentación del satélite en banda Ka estarían suspendidas a la cardán sobre la popa del bus, mientras que las antenas para los enlaces del usuario en banda S (bajada) y L (subida) se situarían sobre la cara del bus que mira hacia la tierra. Estas montadas a su vez sobre un sistema dinámico dirigible del cuerpo del satélite, permitirán orientando sus haces, cubrir todo el campo de vista o bien sólo una porción del mismo para optimizar el área de cobertura. Por su parte el arreglo solar permanecería apuntando hacia el sol mediante un arreglo de control de un sólo eje.

En cuanto al procesamiento de las señales, los satélites Odyssey dispondrían posterior a los LNA correspondientes, una etapa FDM para multiplexar las señales procedentes de las 61 diferentes células, seguida de una translación a banda Ka y un TWTA para la transmisión hacia las antenas de las estaciones base. Obviamente, en sentido contrario los satélites requerirían un convertidor a banda S, un demodulador y en este caso un SSPA para la transmisión hacia las terminales.

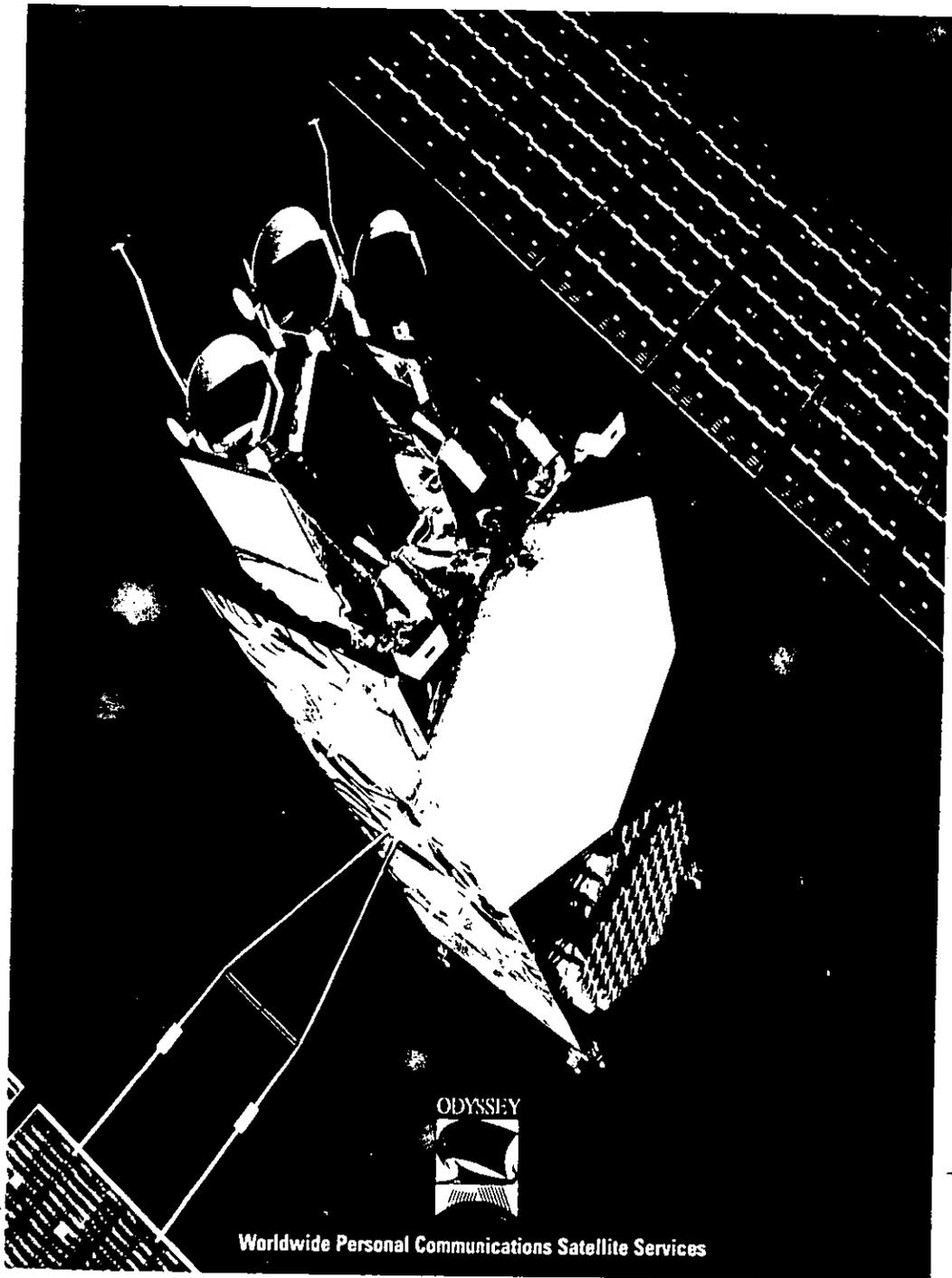
Además, de manera esencial, cada satélite emplearía tecnología CDMA con espectro disperso para los enlaces del usuario, la cual emerge como estándar comercial debido a que facilita el uso de un espectro compartido, pues implica menores requerimientos de coordinación que la señalización TDMA o FDMA y provee un mayor reuso del espectro.

Por su parte, los componentes de la red terrestre Odyssey son:

- OES (Odyssey Earth Station) - Estaciones terrenas Odyssey
- SOC (System Operations Center) - Centros de operación del sistema
- GW (Gateways) - Estaciones locales de interconexión
- OGN (Odyssey Ground Network) - Red terrestre Odyssey

El sistema Odyssey sería controlado por un SOC centralizado que realizaría la planeación y administración del sistema así como las operaciones de servicio y de la red (OGN). ésta última constituida por una red arrendada de fibra óptica (arquitectura de señalización SS7) interconectaría al SOC con siete OES y múltiples GW.

A su vez, los OES realizarían el procesamiento de señales y proveerían los enlaces RF hacia la constelación satelital, los cuales servirían también como enlaces de telemetría y comando; mientras que los GW contendrían un HLR para autorizar el acceso al servicio y brindar conectividad del sistema con PSTN de áreas específicas (los servicios podrían ser escalables).



**Figura 6.10** Los satélites Odyssey pudiesen haber sido lanzados individualmente a bordo de cohetes Delta, Soyus, o Long March o bien, dos a la vez en cohetes Protón o Ariane 4. (Cortesía de Odyssey Telecommunications International Inc.)

La diferencia en el número de satélites y planos orbitales de las constelaciones ICO y Odyssey, favorece al sistema Odyssey en la medida en que dicho sistema pudiese brindar en los enlaces del usuario, ángulos de elevación promedio mayores en 15 grados a los del sistema ICO.

Otra diferencia importante radica en el diseño de los artefactos; específicamente, en los arreglos de antenas. Odyssey emplea arreglos de un menor número de haces (menor interferencia y menor retardo por procesamiento), montados sobre un sistema rígido dirigible que permitiría una cobertura más eficiente. Además, como dichos satélites son más sencillos respecto a su carga útil, el costo del sistema disminuye y en consecuencia, las tarifas de Odyssey se estimarían \$1 dls USD /min, inferiores a las de ICO que consideran \$2 dls USD /min.

Adicionalmente, la facilidad de realizar el procesamiento en Tierra, no sólo simplifica el diseño de los satélites, también permite la modificación del formato de transmisión para nuevos servicios.

## 6.3 SISTEMAS EN ORBITAS BAJAS

### 6.3.1 IRIDIUM

Después del éxito del programa ACT's de la NASA<sup>1</sup>, para el cual Motorola implementó el sistema de conmutación a bordo. En 1987, los ingenieros Bary Bertiger, Ken Peterson y Ray Leopold incorporaron la tecnología probada en dicho programa así como los avances más recientes sobre ondas de luz y microelectrónica de baja potencia, en un proyecto satelital para servicios de telefonía digital que consistía en una constelación de 77 satélites LEO que denominaron Iridium por similitud al número de electrones de tal elemento.

El proyecto fue minuciosamente estudiado, y se perfeccionaron varios aspectos como el tamaño, peso y nivel de rendimiento de los satélites, resultando una menor constelación de 66 satélites. Posteriormente a las propuestas de posibles aplicaciones ante la FCC en conferencias celebradas en Beijing, Londres, Melbourne y Nueva York; en 1991, Motorola fundó IRIDIUM LLC para la implementación y administración de dicho sistema.

Actualmente, IRIDIUM LLC dispone de un capital que asciende a los \$1,900 millones USD y está compuesta por 17 inversionistas (Tabla 6.2), dueños y operadores del sistema satelital, quienes mantienen un contrato con Motorola's Satellite Communications Group (principal inversionista) por \$3,370 millones USD para el desarrollo e implantación del segmento espacial, el cual iniciará su servicio a finales de septiembre del presente año.

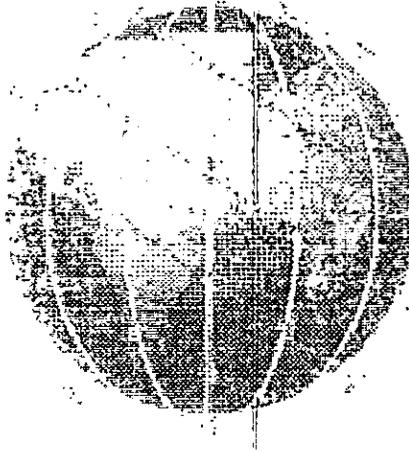
**Tabla 6.2** Inversionistas de IRIDIUM LLC.

Iridium Africa Corporation	Motorola Inc.
Iridium Canada, Inc.	Nipon Iridium Corporation
Iridium China (Hong Kong) Ltd.	Pacific Electric Wire & Cable Co., Ltd.
Iridium India Telecom Limited (IITL)	Raytheon Company
Iridium Middle East Corporation	STET-Società Finanziaria Telfonica per Azioni
Iridium SudAmerica Corporation	Sprint Corporation
Khrunichev Sate Research and Production Space Center	Thai Satellite Telecommunications Co., Ltd
Korea Mobile Telecom	VEBACOM GmbH
Lockheed Martin Corporation	

<sup>1</sup> Programa de \$ 500 millones USD de la NASA que consistió en la prueba de tres principales tecnologías: Comutadores a bordo para telecomunicaciones, transmisiones a través de múltiples haces puntuales, y uso de la banda ka para emular las altas tasas de datos de los cables terrestres de fibras ópticas.

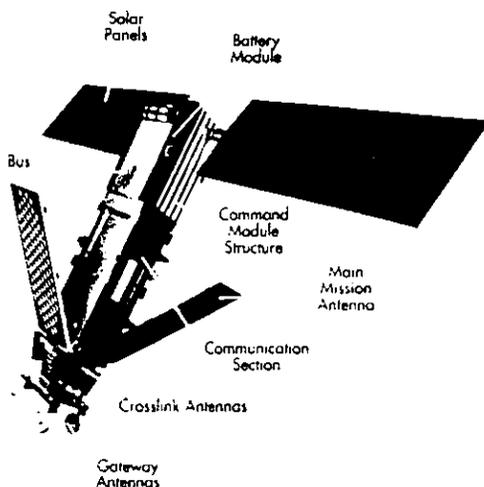
### 6.3.1.1 Constelación espacial

La constelación espacial está integrada por 66 satélites LEO (figura 6.11) que circundan la tierra a 783 Km de altitud (velocidad relativa de 400 Km/min) en seis órbitas cuasipolares corrotacionales de  $86.4^\circ$  de inclinación, en las cuales los grupos de 11 satélites por plano mantienen una separación uniforme nominal de  $32.7^\circ$ . Adicionalmente, cada plano cuenta con un satélite de reserva que orbita a 130 Km por debajo del mismo.



**Figura 6.11** Esquema de la constelación satelital del sistema Iridium. La separación entre los planos orbitales es de  $31.6^\circ$ , excepto entre los planos 1 y 6 que mantienen una separación nominal de  $22.0^\circ$ . (Cortesía de IRIDIUM LLC.)

En esta figura puede apreciarse cómo para evitar una posible colisión en las zonas polares, los satélites adyacentes siempre viajarán en fase a la mitad de la distancia de separación conservando una distancia mínima de 223 Km, lo cual implica que los planos 1,3 y 5 cruzan el ecuador en sincronía, al igual que los planos 2, 4 y 6 en otro instante, en fase. También se distingue la presencia de enlaces intersatelitales entre planos adyacentes (obviamente esto presume ISLs con satélites vecinos del mismo plano), y cómo los planos 1 y 6 resultan mutuamente contrarrotatorios. En base a esto último, es obvio que entre los planos 1 y 6 exista una mayor velocidad relativa entre los satélites y por lo tanto, una separación menor entre dichos planos para proporcionar la misma eficiencia en cuanto a la cobertura.



**Figura 6.12** Esquema de un satélite Iridium. Este consta básicamente de: Tres antenas de misión principal para los enlaces en banda L con las terminales (cada una capaz de proyectar 16 células); cuatro antenas de interconexión para enlaces ISL (banda Ka); cuatro antenas para los enlaces de servicio con los Gateways (banda Ka); dos paneles solares; el tanque de almacenamiento de combustible, y el sistema de comunicaciones integrado por 13 circuitos de aplicación específica. (Cortesía de IRIDIUM LLC.)

En la integración del segmento espacial participan varios de los inversionistas. Lockheed Martin Corporation desarrolla el bus y Raytheon Company ha diseñado el arreglo de antenas en fase (figuras 6.13) para la comunicación con las terminales. Ambos elementos son transportados a las instalaciones de Motorola en Chandler, Arizona, para la integración con el hardware de comunicaciones y otros componentes, en tan sólo cinco días por satélite. En tanto que McDonnell Douglas Corporation (Delta II, capacidad para 5 satélites), Khrunichev State Research and Production Space Center (figura 6.14), y China Great Wall Industry Corporation (Long March 2C, capacidad para 2 satélites) proveerán los servicios de lanzamiento.

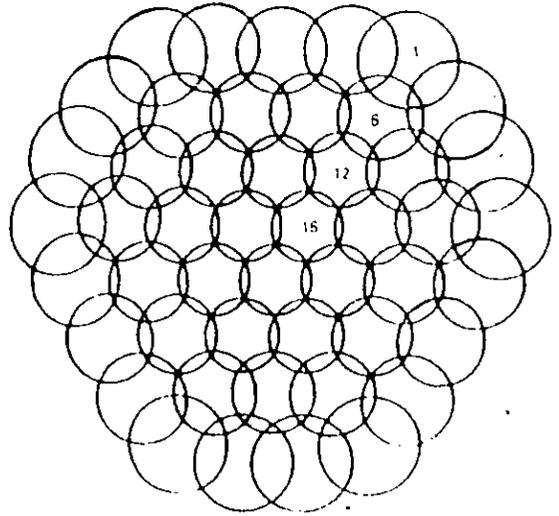
Bechtel, Scientific-Atlanta, Com Dev, Siemens y Nuova Telespazio aportarán otros elementos esenciales en el sistema.

**Tabla 6.3** Características principales de las células más representativas del patrón celular de los satélites Iridium. Véase la figura 6.13. (Cortesía de Motorola.)

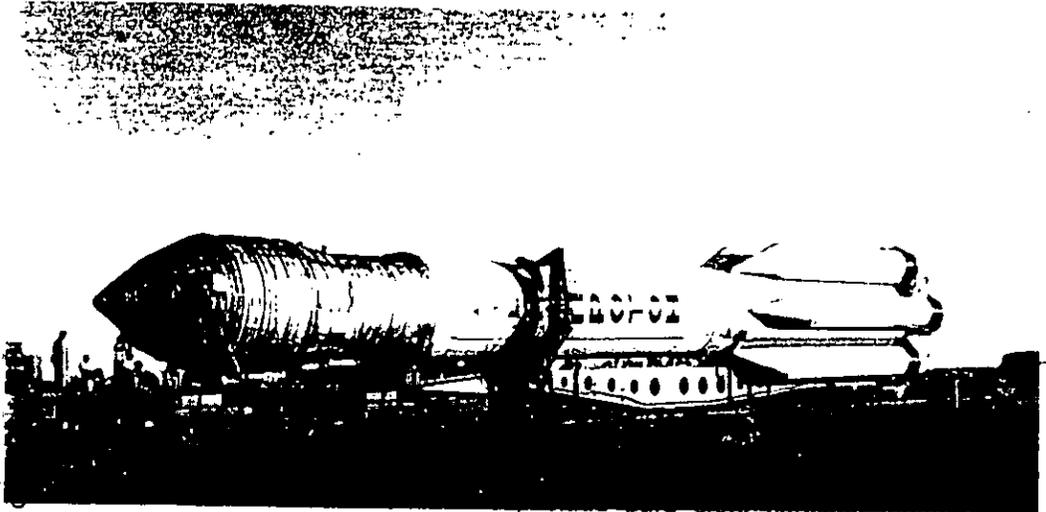
	Célula 1	Célula 6	Célula 12	Célula 16
Angulo azimut. grados	32.4	38.3	40.5	60.0
Angulo nadir. grados	61.9	56.4	48.2	33.4
Angulo de elevación. grad.	8.2	20.8	33.2	51.9
Rango terrestre. Km	2215.3	1424.9	957.3	528.8
Rango de inclinación. Km	2461.7	1696.2	1278.5	960.0

**Tabla 6.4** Características de los enlaces de bajada hacia las terminales Iridium sin y con obstrucciones. Véase la figura 6.13. (Cortesía de Motorola.)

		Célula # 1	Célula # 6	Célula # 12	Célula # 16
Pérdidas por espacio. dB		164.5	161.3	158.8	156.3
Perdidas por propagación. dB		0.7 / 15.7		idem.	
Tx	Potencia, dBW	-6.5 / 5.5	-8.5 / 3.5	-10.8 / 1.2	-7.2 / 4.8
	Ganancia de la antena, dB	24.3	23.1	22.9	16.8
	Perdidas en la circuitería, dB	2.1		idem.	
	PIRE, dBW	15.7 / 27.7	12.5 / 24.5	10.0 / 22.0	7.5 / 19.5
Rx	Intensidad de señal recibida, dBW	-149.5 / -152.5	idem.		
	Ganancia de la antena, dBi	1.0		idem.	idem.
	Temperatura, K	250.0			idem.
	Eb/(No+lo) requerido, dB	5.8	idem.		
	Eb/lo, dB	18.8		idem.	
	Eb/No requerido, dB	6.1			idem.
	Nivel de señal requerido, dBW	151.5	idem.		
	Margen de enlace, dB	3.0 / 0.0		idem.	
	G/ T, dBi/K	-23.0			idem.
	SPFD, dBW/m <sup>2</sup> /4 KHz	-132.8 / -135.8	idem.		idem.



**Figura 6.13** a) Técnicos en la estación 11 de SATCOM (Arizona), integran una de las antenas de misión principal a un satélite Iridium. b) Patrón celular de radiación formado por los 48 haces de un satélite Iridium. En esta se aprecia como las células aumentan su tamaño conforme incrementa el ángulo nadir. Véanse las tablas 6.3 y 6.4. (Cortesía de Motorola.)



**Figura 6.14** El satélite Iridium se ensambla horizontalmente en el angar para posteriormente ser trasladado sobre un tren hacia la plataforma de lanzamiento.

Debido a que el período satelital es de 100 min y 28 seg., el usuario será atendido por un célula diferente del satélite a cada minuto y eventualmente por otro satélite cada 5 minutos en promedio, sin embargo no siempre estarán activos todos los haces del satélite, ya que algunos de estos, al igual que los ISL con satélites adyacentes, deberán apagarse temporalmente al reducirse la distancia entre los planos para evitar interferencias conforme se aproximan a puntos de congestión en las latitudes extremas. En tal condición, la intercomunicación satelital (tabla 6.5) con planos adyacentes podrá realizarse a través de los satélites vecinos que puedan conservar aun dichos enlaces.

**Tabla 6.5** Características de los ISL de los satélites Iridium. (Cortesía de Motorola.)

		IOL	IOL (Sol)	ISL	ISL (Sol)
Rango, Km		4400.0	4400.0	4050.0	4050.0
Margen, dB		1.8	0.0	2.6	0.0
Perdidas por espacio, dB		-192.7	-192.7	-191.9	-191.9
Tx	Potencia, dBW	5.3	idem.		
	Ganancia de la antena (Tx/Rx), dB	36.7		idem.	
	Perdidas cto./apuntamiento (Tx/Rx), dB	-1.8 / -1.8			idem.
	PIRE, dBW	38.4		idem.	
Rx	Intensidad de la señal recibida, dBW	-156.1	-154.3	-156.1	-153.3
	Temperatura, K	720.3	1188.3	720.3	1188.3
	Densidad de ruido, dBW/Hz	-200	-197.9	-200	-197.9
	Ancho de banda del ruido, dBHz	71.0		idem.	
	Enlace Eb/No, dB	7.8	7.5	7.8	8.3
	Eb/lo, dB	27.0		idem.	
	Eb/(No+lo), dB	7.7	7.5	7.7	8.2
	Eb/No requerido, dB	7.7	7.7	7.7	7.7
	Margen de exceso, dB	0.0	-0.2	0.0	0.5

### 6.3.1.2 Segmento terrestre y de control

Un elemento esencial del sistema Iridium son las centrales de conmutación equipadas con estaciones terrenas de comunicación, denominadas Gateways (figura 6.15), las cuales además de realizar diversas funciones pertinentes a la administración del servicio, proporcionan la interconexión con otras redes de telecomunicaciones autorizadas que dispongan equipos que permitan la marcación y el enrutamiento de las llamadas a los códigos asignados por U.I.T. al sistema Iridium a nivel mundial (8816 y 8817).



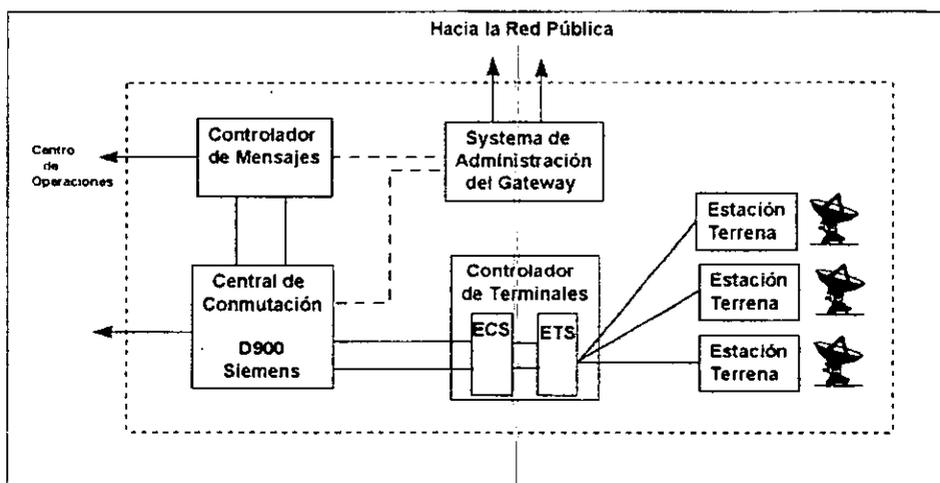
**Figura 6.15** La arquitectura de los Gateways está basada en los sistemas GSM, estándar europeo para comunicaciones móviles digitales que emplea tecnología TDMA. Inicialmente espera contarse con 11 Gateways. (Cortesía de IRIDIUM LLC.)

Internamente, los Gateways contienen un centro de originación de mensajes y una central de conmutación (figura 6.16). El primero, realiza las siguientes funciones:

- Proporciona el puerto de acceso para la transmisión de mensajes
- Controla y administra la base de datos de los suscriptores
- Realiza el proceso de validación de usuarios
- Responde a consultas sobre mensajes previos
- Genera reportes de utilización

Por su parte, la central de conmutación es responsable del procesamiento de llamadas y de las distintas funciones de conmutación:

- Interconexión con la Red pública
- Validación de suscriptores
- Administración de las bases de datos HLR y VLR
- Análisis e interpretación de dígitos
- Asignación de circuitos
- Enrutamiento de llamadas
- Generación de registros de facturación



**Figura 6.16** Diagrama general de un Gateways Iridium. El conmutador D900 (fabricado por Siemens) soporta los protocolos SS# 7 (digital) y MFCR R2 (analógico) (Cortesía de IRIDIUM LLC.)

El sistema Iridium emplea el esquema de cobro "quien llama paga". Su costo de aire satelital está considerado en \$4.50/min dls USD, el cual, para el caso de llamadas a través de redes, deberá ser prorrateado mediante una previa tarifa de liquidación en la que se considerará al tráfico cursado como tráfico internacional.

**Tabla 6.6** Características de los enlaces entre los satélites Iridium y los Gateways. (Cortesía de Motorola.)

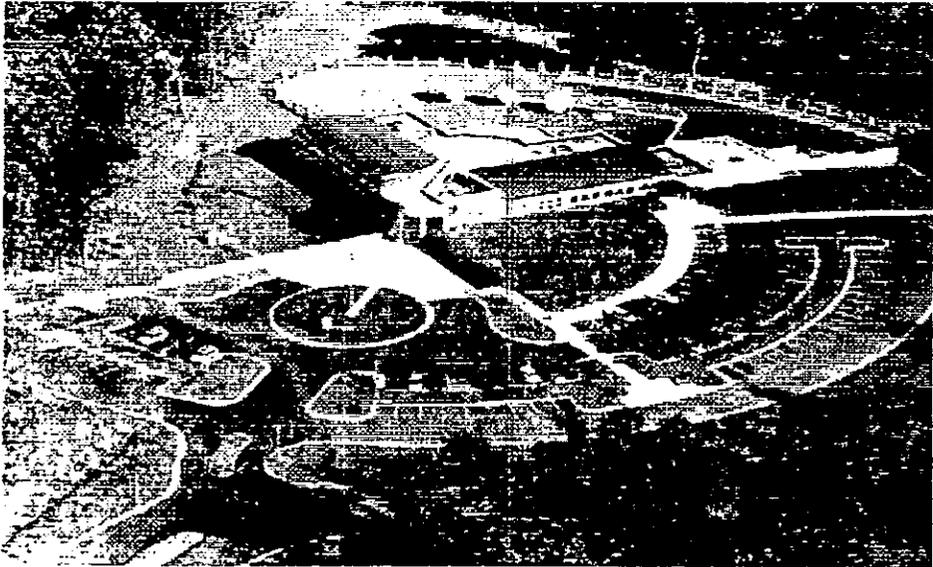
		Enlace de Bajada		Enl. de Subida	
		Lluvia	Claro	Lluvia	Claro
Rango, Km		2326.0		idem.	
Margen, dB		3.2	3.2	2.1	2.1
Pérdidas por espacio, dB		-185.8	-185.8	-189.1	-189.1
Pérdidas por propagación, dB		-14.2	-1.5	-30.0	-1.5
Pérdidas por polarización, dB		-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
Tx	Potencia, dBW	0.0	-9.7	13.0	-11.8
	Ganancia de la antena, dB	26.9	26.9	56.3	56.3
	Perdidas en ctos., dB	-3.2	-3.2	-1.0	-1.0
	Perdidas por apuntamiento, dB	-0.5	-0.5	-0.3	-0.3
	PIRE, dBW	23.2	13.5	68.0	43.2
Rx	Intensidad de la señal recibida, dBW	-180.2	-177.2	-153.4	-149.7
	Pérdida por apuntamiento, dB	-0.2	-0.2	-0.8	-0.8
	Ganancia de la antena, dB	53.2	53.2	30.1	30.1
	Temperatura, K	731.4	731.4	1295.4	1295.4
	Densidad de ruido, dBW/Hz	-200.0	-200.0	-197.5	-197.5
	Ancho de banda del ruido, dBHz	64.9		idem.	
	Enlace Eb/No, dB	7.9	10.9	8.5	12.2
	Eb/lo, dB	25.0	25.0	16.0	16.0
	Eb/(No+lo), dB	7.8	10.7	7.8	10.7
	Eb/No requerido, dB	7.7	7.7	7.7	7.7
	Margen de exceso, dB	0.1	3.0	0.1	3.0
	SPFD* en el gateway, dBW/m <sup>2</sup> /1 MHz	-134.3	-131.1		

\* Consúltese el glosario.

En cuanto al sistema de control de Iridium, este se encuentra integrado por tres estaciones maestras de control, cuatro estaciones TT&C, y una red de operación que recurre al uso de los servicios de satélites comerciales geoestacionarios a 128 KHz para facilitar la supervisión y el intercambio de información entre los componentes mencionados.

Las tres estaciones maestras de control están localizadas en Chandler (SATCOM, Motorola), Virginia e Italia (estación de respaldo). Estas supervisan y controlan el lanzamiento y funcionamiento de los satélites en base a los datos recibidos de las estaciones TT&C, y también desarrollan y distribuyen a través de la red de operación, tablas de enrutamiento a ser usadas por los Gateways y satélites del sistema para el control del patrón de las células de las antenas de misión principal.

Por su parte las estaciones TT&C se sitúan cerca de los polos para tener una mejor visibilidad, esto es en: Iquluit Canadá, Yellowknife Canadá (figura 6.17), Hawaii USA y Eldar Islandia.



**Figura 6.17** Estación TT&C, Yellowknife Canadá. (Cortesía de IRIDIUM LLC.)

### 6.3.1.3 Terminales y servicios

Las terminales telefónicas del sistema Iridium (figuras 6.18) proveerán servicios digitales de voz, fax y datos mediante canales de radiofrecuencia bidireccionales TDMA / FDMA de 2.4 Kbps modulados en QPSK.

La porción FDMA será usada para en los enlaces de bajada para facilitar el reuso de frecuencias, mientras que los satélites emplearán TDMA como sistema de acceso, en el cual la longitud de la trama es de una duración de 90 ms, y cada una contiene cuatro accesos de usuario a 50 Kbps.

**Tabla 6.7** Características de los enlaces de subida de las terminales Iridium hacia los satélites sin y con obstrucciones. (Cortesía de Motorola.)

		Célula # 1	Célula # 6	Célula # 12	Célula # 16
Pérdidas por espacio, dB		164.5	161.3	158.8	156.3
Pérdidas por propagación, dB		0.7 / 15.7		idem.	
Tx	Potencia del HPA (ráfaga), dBW	-4.5 / 5.7	-6.4 / 5.6	-9.1 / 2.9	-5.2 / 5.7
	Ganancia de la antena, dB	1.0	idem.		
	Pérdidas en la circuitería, dB	0.7		idem.	
	PIRE, dBW	-4.2 / 6.0	-6.1 / 5.9	-8.8 / 3.2	-4.9 / 6.0
	Densidad en PIRE, dBW / 4 KHz	-13.2 / -3.0	-15.1 / -3.1	-17.8 / -5.8	-13.9 / -3.0
Rx	Intensidad de la señal recibida, dBW	-169.4 / -174.2	-168.1 / -171.1	-168.3 / -171.3	-161.9 / -166.0
	Ganancia de la antena, dBi	23.9	22.6	22.8	16.4
	Temperatura, K	500.0	idem.		
	Eb/(No+Io) requerido, dB	5.8		idem.	
	Eb/Io, dB	18.0			idem.
	Eb/No requerido, dB	6.1	idem.		
	Nivel de señal requerido, dBW	-148.5		idem.	
	Margen de enlace, dB	3.0/ -1.8	3.0/ 0.0	3.0/ 0.0	3.0/ -1.1
	G/ T, dBi/K	-3.1	-4.4	-4.2	-10.6



Figura 6.18 Terminales del sistema Iridium. (Cortesía de IRIDIUM LLC).

El teléfono Iridium Kyocera, es un teléfono celular para servicios de voz, fax y datos que puede ser empleado en áreas de cobertura con tecnologías PDC, AMPS, GSM o CDMA, y que adicionalmente cuenta con una unidad removible (opcional) que provee capacidad para acceder a la red satelital IRIDIUM. De manera análoga, el teléfono Iridium de Motorola, posee un puerto de conexión para computadoras personales (para la transmisión de fax o datos) y un compartimiento donde se insertan los cartuchos (cassettes) intercambiables para los diferentes protocolos de infraestructura inalámbrica terrestre: AMPS; GSM; DCS 1800; CDMA; PCS. Este opera en modo dual y dispone de un módulo identificador de usuario (SIM-Subscriber Identify Module) para facilitar opciones personalizadas e incrementar la seguridad de uso. Adicionalmente motorola también ha creado un radiolocalizador para el sistema el cual será comercializado hasta el próximo año, una vez que se tengan resultados del servicio.

Mientras los teléfonos tendrán un valor cercano a los \$ 500 - \$ 700 dlls USD, los pagers que prevén un costo aproximado a los \$ 200 dlls USD.

**Tabla 6.8** Características de las terminales IRIDIUM de Motorola. (Cortesía de IRIDIUM LLC.)

Teléfono	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Baterías de iones de litio</li> <li>▪ 2 horas continuas de conversación</li> <li>▪ 24 horas en estado de "standby"</li> <li>▪ Carga rápida en 25 horas</li> <li>▪ Peso: 453 gr. (incluyendo el cartucho terrestre)</li> <li>▪ Volumen: 410 cm<sup>3</sup></li> <li>▪ Potencia promedio: 0.645 W</li> </ul>
Pager	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Despliegue de 80 caracteres alfanuméricos en cuatro renglones</li> <li>▪ Pantalla holagráfica OPTIMAXTM</li> <li>▪ Caracteres multi-idiomas pre-seleccionados</li> <li>▪ Luz de fondo electroluminiscente (EL)</li> <li>▪ Memoria para 16 direcciones</li> <li>▪ Mensajes programables de bienvenida</li> <li>▪ Reloj con tiempo real</li> <li>▪ Despliegue de dos zonas de usos de horarios</li> <li>▪ Registro de los mensajes con horario y fecha</li> <li>▪ Mensajes en orden numérico secuencial</li> <li>▪ Alarma de viaje</li> <li>▪ Selección de alertas de recepción de mensajes</li> <li>▪ Vibración silenciosa</li> <li>▪ Directorio telefónico</li> <li>▪ Medidor de batería</li> <li>▪ 30 días de vida estimada, de la batería empleada (Alcalina AA)</li> <li>▪ Clip para llevarlo en el cinturón</li> </ul>

Adicionalmente existirán terminales aéreas, marítimas, terrestres (sobre vehículos), semifijas y fijas que emplearán la misma tecnología. De manera global, podemos resumir al sistema Iridium mediante el esquema de la figura 6.19 y los datos de la tabla 6.9.

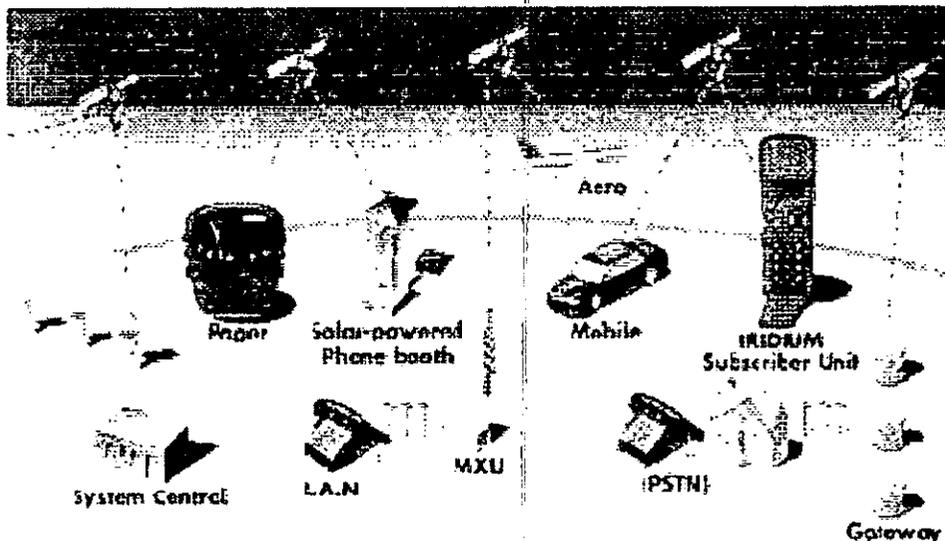


Figura 6.19 Sistema Iridium. (Cortesía de IRIDIUM LLC.)

Tabla 6.9 Principales características de los satélites Iridium. (Cortesía de Motorola.)

Tipo de estabilización	Tres ejes
Tiempo de vida útil	5 - 8 años
Peso (incluyendo combustible)	689 Kg
Movimientos permisibles respecta a la órbita	5.7 Km tangente a la órbita 4.7 Km en altitud 2.0 Km en altitud
Cobertura terrestre / satélite	15.28 millones de Km <sup>2</sup>

continuación .....

Polarización de la señal	Circular derecha (Terminales) Circular derecha (Gateways) Vertical (ISLs)
Modulación de la señal	QPSK en todos los enlaces
Tasa del FEC	Múltiples tasas (Terminales) 1/2 (Gateways) 1/2 (ISLs)
Tasa de datos codificados	0.05 Mbps (Terminales) 6.25 (Gateways) 25.0 (ISLs)
Banda de frecuencias	1621.35-1626.5 MHz (Terminales) 19.4-19.6 GHz (Gateways-up) 29.1-29.3 GHz 23.18-23.38 Ghz (ISLs)
Frecuencia central	1621.25 MHz (Terminales) 29.40 Ghz (Gateways -up) 20.00 Ghz 23.28 Ghz (ISLs)
Ancho de banda / canal	31.5 KHz (Terminales) 4.375 MHz (Gateways) 17.50 MHz (ISLs)
Separación entre canales	41.67 KHz (Terminales) 7.5 MHz (Gateways) 25 MHz (ISLs)
Máximo número de canales	3840 en c/dirección (Terminales) cerca de 6000 (ISL) cerca de 3000 (Gateway)
Sistema de energía eléctrico	< 1200 W Arreglo solar < 50 A.h Bateria
PIRE del satélite	7.5 - 27.7 dBW (Terminales) 13.5 - 23.2 dBW (Gateways) 38.4 dBW (ISLs)
Potencia de salida del amplificador final	0.1-3.5 W/portadora (Terminales) 0.1- 1.0 W/ canal (Gateways) 3.4 W /portadora (ISLs)
G/T	-10.6 a -3.1 dBi/K (Terminales) -1.0 dBi/K (Gateways) 8.1 dBi/K (ISLs)
Temperatura de ruido del sistema de recepción	500 K (Terminales) 1295 K (Gateways) 720 K (ISLs)

### 6.3.2 GLOBALSTAR

Durante la década de los 80's, QUALCOMM y Space Systems/Loral (SS/L) desarrollaron independientemente los conceptos de diseño y las innovaciones técnicas que integran al sistema Globalstar. Mientras que en 1986 QUALCOMM comenzó a trabajar en un servicio mundial de telecomunicaciones basado en satélites, SS/L (siendo una división de Ford Motor Company) inició investigaciones sobre la factibilidad técnica de una constelación LEO como medio para proporcionar un sistema de transmisión de voz, ubicación de posición y transmisión de mensajes para autos de lujo.

Sin embargo, posterior a la adquisición de SS/L por Loral, fue formada en junio de 1991 Loral Qualcomm Satellite Services Inc., (LQSS), originalmente conocida como Loral Cellular Systems Corp., con el propósito de solicitar a la FCC un permiso para la construcción de un sistema tipo Globalstar. Dicha solicitud de licencia fue transferida a Loral Qualcomm Partnership (LQP), socio general de LQSS en marzo de 1994, para ser utilizada para el beneficio exclusivo de Globalstar.

Adicionalmente, también se realizaron considerables estudios y desarrollos para la tecnología de apoyo de Globalstar por parte de Alcatel y Alenia Spazio (este financiado por donaciones de la ESA), para finalmente formalizar en marzo de 1994 cambiar de razón social a Globalstar Limited Partnership, la cual está integrada por:

- Loral Corporation (Nueva York, USA)
- Qualcomm Inc. (San Diego, USA)
- Space Systems / Loral (Palo Alto, California, USA)
- Alcatel (París, Francia)
- Alenia Spazio (Italia),
- Dacom (Seul, Korea)
- Hyundai Electronics Industries Co., Ltd
- Vodafone (Inglaterra).
- AirTouch Communications
- Finmeccanica (Italia)
- Daimler-Benz Aerospace (Munich, Alemania)
- Vodafone Group (Newbury, Inglaterra)
- France Telecom

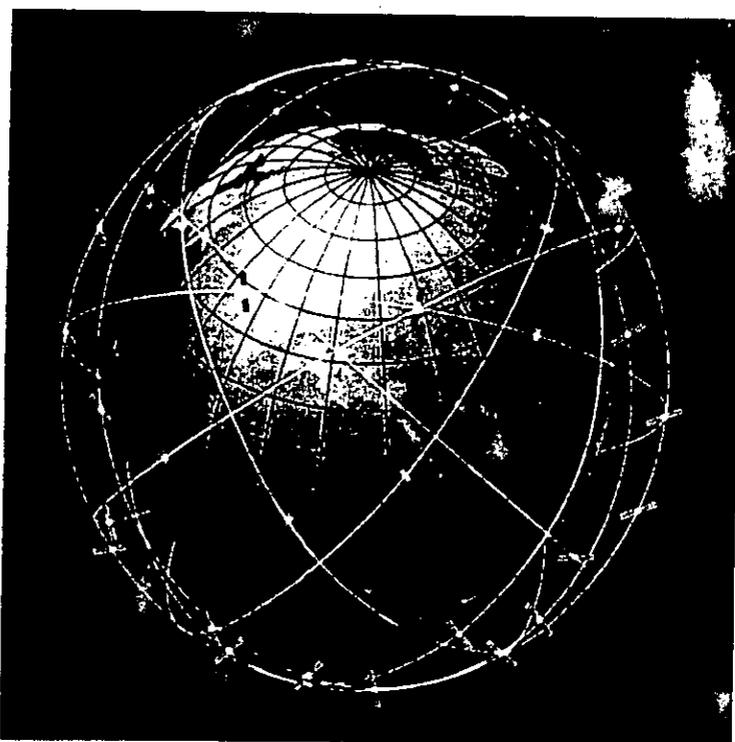
Con sede en San José, California, Globalstar proyecta requerir un capital activo de aproximadamente \$2,500 millones dls USD (los inversionistas esperan comenzar a generar un flujo positivo de fondos en 1999).



**Figura 6.20** El sistema globalstar usa elementos de CDMA y FDMA, combinados con tecnología MBA (Multiple Beam Antenna) y un codificador de voz de tasa variable de avanzada tecnología para crear uno de los más eficientes sistemas de modulación y de acceso propuesto hasta la fecha en cuanto a sistemas satelitales de comunicación móvil. (Cortesía de Globalstar Limited Partnerships.)

### 6.3.2.1 Segmento espacial

Las órbitas de los satélites, elegidas para minimizar el número de artefactos necesarios considerando una cobertura proporcional a la densidad poblacional, integran una constelación Walker 48/8/1<sup>1</sup> a 1,414 Km de altitud compuesta de 8 planos orbitales inclinados a 52° (cada uno con 6 satélites activos y uno más de reserva) que evitan tanto los cinturones de Van Allen como el cinturón de escombros y brindan una cobertura total permanente a latitudes entre 70° norte y sur, y periódicamente a latitudes entre 70° y 80° norte y sur.



**Figura 6.21** Configuración satelital del sistema Globalstar (Cortesía de Globalstar Limited Partnerships.)

<sup>1</sup> Walker es uno de los tipos de constelaciones circulares más conocidas (otras constelaciones comunes son Beste y Ballard) que consiste de un subconjunto especial de órbitas circulares inclinadas, donde cada arreglo está diseñado por tres parámetros: T - número total de satélites, P - número de planos equiespaciados y F - factor de fase para satélites en planos adyacentes ( $360^\circ/T$ ).

Puesto que a dicha altitud, los satélites cubren áreas de 5760 Km (estos orbitan en un periodo de 114 minutos), existe un traslape entre los patrones de cobertura que permite relativamente modestos requerimientos de control, disminuyendo la complejidad del sistema monopropulsante de hidrazina, que implica significativamente menores partes que los sistemas bipropulsantes, restando así, masa (450 Kg al momento del lanzamiento) y volumen (1.78x0.96x0.58 m) a los satélites triaxiales de Globalstar diseñados para una vida útil de 7 años y medio que disponen de una capacidad total de transmisión/recepción de 1000 watts, emplean arreglos solares de celdas de silicio, baterías de celdas de Niquel-Hidrógeno (usadas por más de una década en los satélites de comunicación de SS/L) y adicionalmente cuentan con receptores GPS que simplifican enormemente el mantenimiento en órbita pues proveen una temporización y frecuencia de referencia para la carga útil del satélite.

La banda de frecuencia asignadas para los enlaces de Globalstar son las siguientes:

- Enlaces usuario: 1610 - 1621.35 MHz (subida) banda L  
2483.5 - 2500 MHz (bajada) banda S
- 
- Enlaces de alimentación: 5091 - 5250 MHz (subida) banda C  
6875 - 7055 MHz (bajada) banda C

Adicionalmente, para lograr un bajo costo, reducir el riesgo tecnológico y acelerar el despliegue del sistema Globalstar, los satélites de la constelación espacial cuentan con tecnología muy avanzada (ya probada en otros satélites) pero actúan en esencia como simples repetidores con translación de frecuencias que retransmite las señales recibidas directamente hacia la tierra, dejando en tierra todas las operaciones de procesamiento y conmutación de llamadas del sistema, donde presentan acceso de mantenimiento y pueden beneficiarse de los continuos avances tecnológicos.

En el afán de lograr una capacidad y un costo efectivo en la banda de 16.5 MHz, el campo de vista de cada satélite es dividido mediante antenas MBA (Multiple Beam Antenna) de SS/L en 16 haces (haciendo uso de la tecnología CDMA de Qualcomm es posible reusar el rango de frecuencias 16 veces) mediante 16 convertidores de translación de frecuencias en ambas direcciones del satélite y dos arreglos activos de antenas en fase<sup>1</sup> (figura 6.22) que incorporan funcionalidad de múltihaces en un reducido espacio del vehículo. Tanto el arreglo receptor como el arreglo transmisor, centrados en sus respectivas bandas, proyectan 16 haces y operan mediante recientes amplificadores a base de circuitos integrados monolíticos de microondas altamente funcionales (MMIC-Monolithic Microwave Integrated Circuit), los cuales acoplados directamente a cada elemento radiante proveen un sistema de alta figura de mérito (G/T) y PIRE, presentando así, un desempeño superior al de satélites anteriores, tanto en la eficiencia de la potencia en RF en la dirección de transmisión como en la eficiencia de la densidad de flujo de entrada según la relación C/N (carrier to noise) en el extremo receptor del arreglo de antenas.

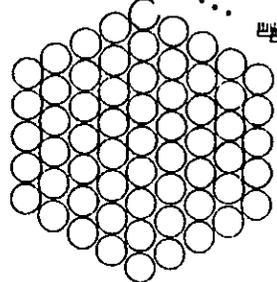
Los arreglos de antenas en fase de Globalstar (figura 6.23) usan desplazadores pasivos en fase para la orientación de los haces<sup>2</sup> gobernados por la red de formación de haces (BFN -Beam Forming Network) que se encuentra ubicada en el interior de los HPA y LNA para reducir sus pérdidas (37 a 40 dB debido a que está implementado en microcinta) y evitar afectar el desempeño total de la antena.

---

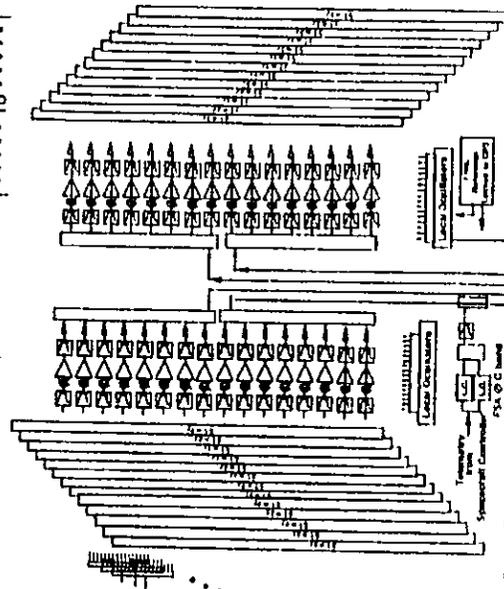
<sup>1</sup> Los arreglos en fase habían sido usados en sistemas de radar o puramente en sistemas de comunicación TDMA con pulsos modulados donde la amplitud lineal de la señal no era importante. Sin embargo para este sistema tanto la eficiencia como la linealidad son muy importantes debido a que son factores que determinan la capacidad del sistema. Ultimamente, son una porción sustancial para el establecimiento de la carga para cada minuto del tiempo de llamada. Por esta razón, son usados arreglos activos.

<sup>2</sup> Estos no tenían mucha aplicación anteriormente debido a que presentaban demasiadas pérdidas de la señal entre los elementos de la antena y los amplificadores asociados

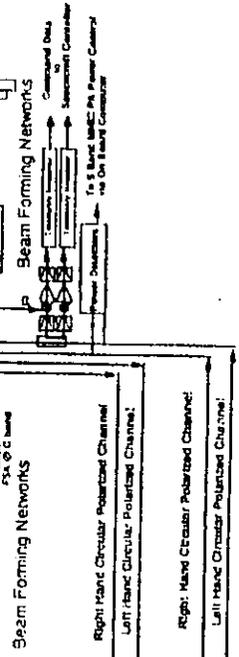
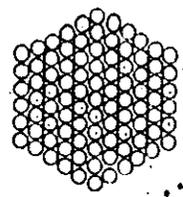
1610 - 1626.5 MHz  
 61 elements,  
 each w/ filter & LNA



.....16.....



2483.5 - 2500 MHz  
 91 Elements, each w/  
 4.5W SSPA & filter



7 GHz



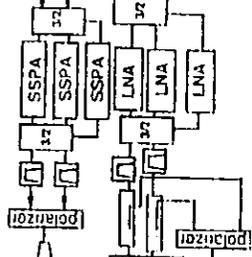
to earth

5 GHz



to earth

anti-earth



\* Patent Applied For

Figure 4. Globalstar satellite payload block diagram.

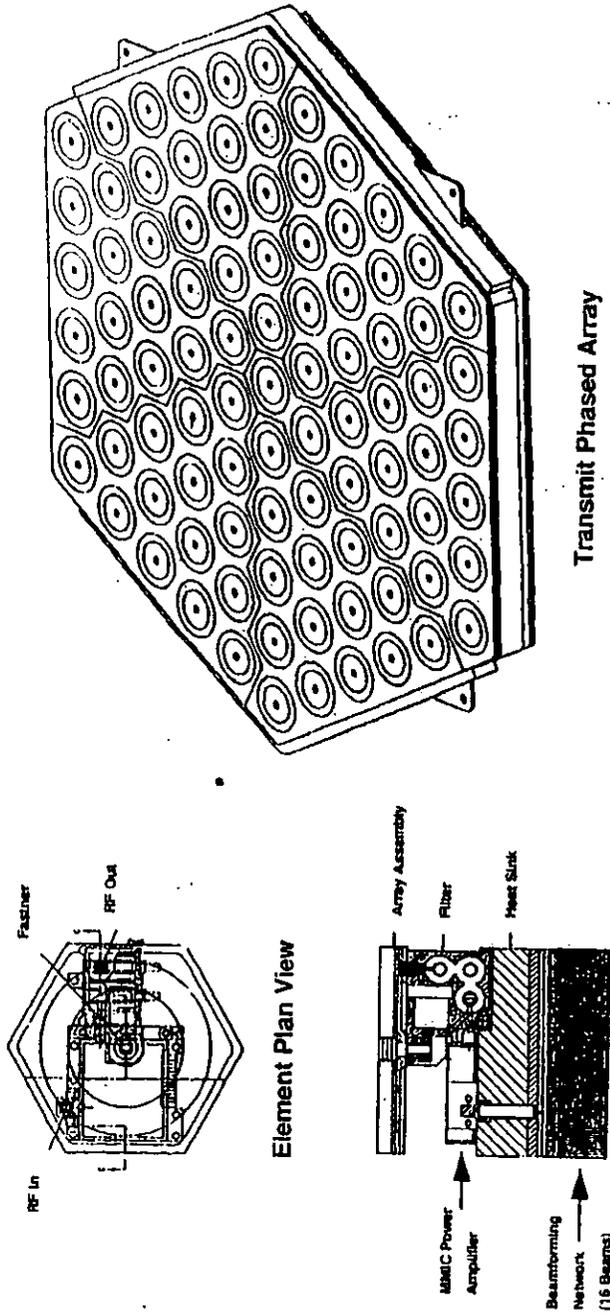
Figura 6.22 Diagrama de bloque de la carga útil del satélite. (The Globalstar System, Applied Microwave & Wireless Summer 1995.)

El BFN no presenta cables coaxiales ni guías de ondas, este consta de un circuito impreso de 32 capas alojadas en 64 superficies de circuitería de cobre atacado unido para estabilizar la temperatura del teflón (material dieléctrico de muy elevada resistencia) utilizado. Un BFN combina o divide la energía (respectivamente para recibir o transmitir) de y hacia cada elemento en 16 partes iguales para alimentar los 16 haces generadores. Cada haz generador establece la relativa amplitud y fase ponderadas para cada elemento radiante del arreglo. El valor de dicha ponderación, a su vez establece la dirección del haz, su ganancia y forma. Un haz generador está compuesto de dos de los 32 circuitos impresos mencionados anteriormente. La interconexión entre estas tarjetas (superficies) es a través de agujeros metalizados. La interconexión entre los 16 haces generadores es por acopladores entre capas, consecuentemente los agujeros metalizados no son requeridos a través de más de dos capas. Una imagen de un haz generador se muestra en la figura 6.24. Los 37 a 40 dB de pérdidas son a causa de las interconexiones referidas incluyendo los 16 divisores/combinadores de potencia y los 61 o 91 divisores/combinadores de cada elemento así como las estructuras para establecer la ponderación de amplitud y fase <sup>1</sup>.

Como los satélites pasan sobre los centros de población del usuario, se requiere que la potencia pase de un haz a otro, sin cambiar la demanda sobre los amplificadores individuales para evitar virtualmente una temperatura o inclinación en el nivel de la señal a través del arreglo, que pudiera de alguna manera provocar una diferencia en las características de amplitud o fase y generar la degradación del desempeño del arreglo. Para ello, se recurre al hecho de que cada generador formador de un haz en la antena transmisora tiene un coeficiente de amplitud de la unidad, así cada amplificador puede experimentar simultáneamente la misma potencia en el mismo tiempo sin tener que desconectar o conectar determinados amplificadores para cada haz.

---

<sup>1</sup> Uno de los 16 haces generadores en el arreglo transmisor. Los HPAs asociados al arreglo sirven a todos los 16 haces simultáneamente y proveen un incremento del 33% en la eficiencia de la potencia (incluyendo aisladores integrados).



**Figura 6.23** Arreglo transmisor contiene 91 elementos radiantes conectados SSPAs construidos a base de MMIC. En esta figura se aprecia como solo las componentes funcionales entre estos amplificadores y las antenas radiadoras son filtradas, la transmisión media e híbridas actúan como polarizadores. La pérdida total debido a estas componentes pasivas se mantiene en menos de 2 dB. La antena receptora es casi idéntica excepto que usa LNAs en lugar de HPAs y contiene solo 61 elementos radiantes. (The Globalstar System, Applied Microwave & Wireless Summer 1995.)

De esta manera, aunque en una situación práctica algunos los haces son requeridos para manejar potencias cercanas al máximo y en algunos otros casos potencias considerablemente menores, los mismos amplificadores son empleados para todos los haces simultáneamente, por lo que la potencia se mueve libremente de un haz a otro, en base a la demanda, y la energía no es desperdiciada en vías de corriente no usadas por los amplificadores.

En otro sistema propuesto, por ejemplo, esta misma funcionalidad se lograría mediante cuatro amplificadores multipuertos de 8 líneas (para abastecer los 32 haces). Los amplificadores multipuertos fueron considerados para este sistema pero fueron rechazados debido a que la red híbrida implicaba una pérdida de 3 o más dB entre los SSPAs (de los amplificadores multipuertos) y los alimentadores del arreglo. En contraste, el sistema de antenas combina las salidas de sus múltiples amplificadores MMIC en espacio libre, y por consiguiente no presenta significativas pérdidas. La ventaja de esta característica puede ser apreciada al reconocer que con este sistema la banda S del satélite para transmisión requiere cerca de 1000 watts de la potencia principal como salida máxima, mientras que otros satélites de comunicación no configurados requieren el doble de esta potencia para la producción de un PIRE comparable.

La consideración de las vías de potencia es también un factor importante en los HPAs. Típicamente, una operación clase A puede ser requerida en estos amplificadores para proveer un NPR (Relación en banda base del ruido en un canal respecto al resto del ruido en el sistema) de 17 dB. En este caso, los transistores PHEMPT (Pseudomorphic High Electron Mobility Power Transistor) dispositivos integrados con manejadores MMIC desarrollados para este sistema por Raytheon Corporation mantienen su NPR mientras operan en una amplificación clase A-B. Además, estos operan con virtualmente la misma ganancia y otras características de transferencia a través de una fuente de voltaje con rango de 2 a 8 volts.

El incremento de la eficiencia en potencia para este rango varía por casi 10% pero la capacidad en potencia varía 16 dB. Esto significa que la potencia de consumo de la antena transmisora/HPAs es ajustable de 130 a 1350 watts con un pequeño sacrificio de eficiencia. A continuación, la tabla 6.10 proporciona un resumen de las características de diseño de los amplificadores MMIC.

**Tabla 6.10** Parámetros de diseño de los amplificadores MMIC empleados en los arreglos activos de antenas en fase de Globalstar. (The Globalstar System, Aplied Microwave & Wireless Summer 1995.)

	LNAs (61 a bordo)	HPAs (91 a bordo)
Rango de frecuencia	1610-1621.5 MHz	2483.5-2500 MHz
Figura de ruido	1.6 dB máx.	
Potencia de salida	4.5 W @ NPR = 17 dB	
Ganancia	40 dB min.	50 dB min.
Eficiencia	33 % min.	
Desajuste en fase	6° máx. (incluyendo filtros)	6° máx. (incluyendo filtros)
Desajuste en amplitud	0.5 dB (incluyendo filtros)	0.5 dB (incluyendo filtros)
Rango en capacidad de potencia	16 dB	

En contraparte, para los enlaces de comunicación con los Gateways, el espectro de frecuencias de cada uno de los 16 haces de usuario es combinado usando FDMA dentro de un canal de frecuencias de 160 MHz (la mitad de los 16 haces son transmitidos en RHCP y la otra mitad en LHCP) que es transmitido a través de las antenas de 5 y 7 GHz en un sólo haz que pueden operar con baja ganancia debido a que los Gateways disponen de antenas de muy alta ganancia de 5.5 m de diámetro.

En los satélites, la densidad del flujo de potencia de los Gateways medida sobre los enlaces de subida de 5 GHz, es usada para controlar la capacidad de potencia en los HPAs de 2.5 GHz mediante convertidores reductores dc/dc de control especial desarrollados para este sistema, los cuales mantienen la eficiencia en un rango de 82 a 92 % al variar de 2 a 8 volts su voltaje de salida (produciendo más de 180 ampers en su más alto estado de potencia) mediante un pulso modulado por el ciclo de trabajo de un interruptor interno. La salida promedio de 8 volts corresponde a un ciclo de trabajo de casi el 50%, la salida de 2 volts a un factor de 12.5% y así sucesivamente.

La potencia de salida resultante es entonces regulada e integrada a un filtro de baja pérdida para producir el estable nivel dc requerido para la corriente de polarización de los amplificadores. La combinación de la modulación por ancho de pulsos (PWM-Pulse Width Modulation) y la potencia de un FET con muy baja resistencia en estado de conducción (unos cuantos miliohms) contribuyen a una alta eficiencia sobre el amplio rango del voltaje de salida.

De manera análoga, un control de potencia similar implementado para los amplificadores de alimentación de 7 GHz reduce su consumo de potencia de 280 watts en tráfico máximo a menos de 90 watts en instantes de tráfico mínimo. Así, ambos controladores permiten que el consumo total en potencia de cada satélite varíe de 600 watts en estado estable a más de 2000 watts en picos de alta demanda.

Loral Corporation tiene la responsabilidad de la gerencia general respecto al sistema Globalstar, su diseño, construcción, despliegue y operaciones. Además, construirá los centros de control de operaciones de los satélites (SOCC) y las porciones de sus centros de control de operaciones en tierra (GOCC), mientras que Space System/Loral (SS/L) tiene un contrato a precio fijo para la construcción de la primera generación de satélites Globalstar (48 activos y 8 más de reserva en órbita), la cual acometerá conjuntamente con diferentes miembros de la alianza de Sistemas Espaciales (Aerospatale Società Nazionale Industrielle, Alcatel, Daimler-Benz Aerospace y Finmeccanica) y Hyundai de la siguiente manera:

- *Aerospatale Espace & Defense (París, Francia)* fabrica las estructuras de los satélites y de los elementos de control térmico.
- *Alcatel Espace (parís, Francia)* diseña, produce e integra todos los módulos de la carga útil y fabrica los transpondedores.
- *Alenia Spazio (Roma, Italia)* responde por el ensamblaje, prueba e integración final de los satélites dentro de su planta de 6000 m<sup>2</sup>.
- *Daimler-Benz Aerospace* (antiguamente Deutsche Aerospace AG) actual filial de Daimler-Benz AG, proporciona los elementos de capacidad de propulsión para los satélites, conglomerados solares y subsistemas de ubicación y de control orbital.
- *Hyundai (Seúl, Corea del Sur)* fabrica los subsistemas electrónicos principales para los satélites Globalstar.

El servicio globalstar se prestará a través de una constelación de 48 satélites LEO. Con el lanzamiento de 32 satélites se podrá ofrecer comunicaciones comerciales para mediados de 1998. mientras que la cobertura completa con 48 satélites ocurrirá en el primer semestre de 1999.

Debido a su pequeño tamaño y peso es factible el lanzamiento en grupos de 8 o más satélites a bordo de lanzadores GEO comerciales. En base a esto SS/L seleccionó los siguientes proveedores de servicios de lanzamiento:

- *McDonnell Douglas (St. Louis, Missouri)* - lanzará ocho satélites de Globalstar a bordo de dos cohetes Delta II. SS/L tiene opciones para hasta diez lanzamientos con Deltas.
- *NPO Yuzhnoye (Kiev, Ucrania)* - lanzará un total de 36 satélites Globalstar en tres vehículos de lanzamiento Zenit-2.
- *Starsem (París, Francia)* - lanzará los 12 últimos satélites Globalstar de la primera generación a bordo de tres lanzadores Soyuz. SS/L tiene la opción de ocho lanzamientos adicionales en vehículos Soyus.

Globalstar está convencido de que su sistema será menos costoso de diseñar y construir, y que puede ser desplegado antes que cualquier otro de los sistemas que se han propuesto.

#### 6.3.2.2 Segmento terrestre

Globalstar ha suscrito un contrato con Loral AeroSys para el diseño y entrega de dos centros de control de operaciones de satélites (SOCC- Satellite Operations Control Centers) que rastrearán, monitorearán y controlarán todos los subsistemas de la constelación de satélites utilizando unidades de comando y telemetría ubicadas en varias gateways alrededor del mundo y dos estaciones de telemetría (cuando menos una estará en EUA).

En contraparte, como Globalstar ha recibido licencia exclusiva para utilizar la tecnología CDMA de Qualcomm para aplicaciones MSS, este último diseñará y manufacturará las tanto los gateways como las terminales, y en consecuencia, también tendrá la responsabilidad primaria (también participa Loral) del diseño, desarrollo, fabricación, instalación, prueba y mantenimiento de dos centros de control de operaciones en tierra (GOCC- Ground Operations Control Centers), los cuales realizarán las siguientes funciones:

---

Tanto los GOCC como los SOCC tiene sus unidades de respaldo separadas geográficamente (para prevenir casos de desastres naturales). Todas los centros están unidos mediante infraestructura terrestres disponible para evitar la necesidad de duplicar infraestructuras ya existentes.

- planificación y control de la utilización de satélites por terminales de acceso.
- coordinación de la información recibida por los SOCC.
- monitoreo del funcionamiento del sistema.
- recolección de información para la facturación a proveedores de servicio
- control de acceso para evitar que los gateways excedan la capacidad asignada.
- asignación dinámica de la capacidad del sistema entre las regiones cercanas para atender los cambiantes patrones de demanda

Los Gateways son los puntos de interconexión entre la constelación de los satélites de Globalstar y las redes de telecomunicaciones existentes con base en la tierra. Cada nación con al menos una estación de acceso dentro de sus fronteras tendrá un control completo sobre el acceso al sistema por usuarios dentro de su territorio. Se espera que una sola estación de acceso sea capaz de proporcionar una cobertura fija sobre un área superior a Arabia Saudita y una cobertura móvil casi tan grande como Europa Occidental. De este modo, una cobertura pseudo global con base en tierra que virtualmente una todas las áreas habitadas del globo, teóricamente podría ser alcanzada con sólo 100 gateways. Sin embargo, Globalstar cree que hasta 210 estaciones de acceso o gateways pueden ser necesarias para minimizar cargos de larga distancia con base en tierra y para respetar las fronteras entre naciones.

Aunque algunos gateways cuentan con equipo para enviar y recibir hacia el satélite comandos de telemetría y datos utilizando las distintas portadoras en banda C, en general cada gateway contendrá un conmutador, una sección de RF y un controlador CDMA.

La sección de RF normalmente incorpora cuatro antenas de rastreo para los enlaces de subida y bajada en banda C, que seleccionan alguno de los típicamente tres satélites de la constelación en línea de vista. Una antena rastrea sólo uno de los satélites en línea de vista mientras que la cuarta antena esta girando para adquirir el próximo satélite. Un número menor de antenas son utilizadas cuando el área de servicio es limitada o bien en latitudes donde solo dos satélites estén normalmente en línea de vista.

En tanto, el controlador CDMA será subdividido para su atención, pues este integra importantes características en el diseño del sistema.

1. Tecnología CDMA - Desarrollada por Qualcomm y probada por docenas de sistemas de comunicación, está ya ha sido codificada en el estándar U.S. EIA/71A IS-95 CDMA.

2. Reuso de frecuencias - CDMA logra mayor eficiencia en el reuso de frecuencias que otras técnicas debido a su tolerante interferencia en co-canal. En los sistemas FDMA y TDMA, el reuso de frecuencias está limitado por la necesidad de alcanzar una adecuada relación portadora/interferencia (C/I -Carrier to Interference) <sup>1</sup>. En los sistemas satelitales de múltiples haces que usan técnicas TDMA o FDMA, la mayor fuente de interferencia son las señales de los haces adyacentes (véase la figura 3.11) evitando el reuso de frecuencias entre haces adyacentes. Esto también impone complicados requerimientos respecto a la aislación entre haces adyacentes. La aislación de haces típica requerida para sistemas FDMA o TDMA puede ser de 18 dB o más. Por ejemplo, en sistemas celulares, el reuso de una frecuencia es de uno en siete para un adecuado desempeño. Esto significa una no será reusada por ninguna llamada en ninguna célula vecina.

En CDMA, un gran número de señales pertenecen a usuarios en co-canal sobre un canal de amplio ancho de banda de frecuencias. Por lo tanto cada señal genera ruido en los receptores de otras señales, sin embargo el sistema está diseñado para que exista un gran número de señales en co-canal, de esta forma, ninguna interferencia domina la situación. En su lugar, el promedio de la potencia de todas las interferencias de las señales determina la C/I para cada señal. En la práctica, esto significa que el espectro puede ser reusado en todas las células (o en cada haz) siempre con una aislación de haz tan baja que oscila entre 2 y 3 dB.

Este resultado incrementa la capacidad de reuso sobre los actuales sistemas analógicos en 10 a 20 veces. Notablemente, debido a las técnicas de modulación digital y corrección de errores, este incremento en capacidad es acompañado por un actual incremento en la calidad del enlace de radio.

3. Control de potencia - A través del control de potencia, todas las señales arriban a los receptores CDMA con casi el mismo nivel sin interferir de manera dominante. Esto es posible por el uso dinámico de un lazo cerrado y un lazo abierto para el control de potencia tanto en los gateways como en las terminales. Además, las antenas de múltiples haces del satélite, están diseñadas para compensar la diferencia de las pérdidas de los enlaces entre los usuarios cercanos y lejanos.

---

<sup>1</sup> La C/I es determinada por la relación de la señal deseada respecto a la suma de todas las señales en co-canal (y el ruido térmico).

Debido a que el retardo de un enlace satelital supera el retardo en sistemas terrestres, el control de potencia de lazo cerrado opera con un reducido ancho de banda. Mientras que el lazo abierto controla a distancia la potencia cuando detecta una disminución en la intensidad de la señal a causa de alguna obstrucción (esta fluctuación es mucho menor en los sistemas satelitales en virtud de la diversidad de trayectoria).

4. Diversidad de trayectoria - Intencionalmente un gateway se comunicará con un usuario a través de varios satélites simultáneamente. Esto es posible debido a la ventaja de la modulación CDMA que permite que las señales retardadas usen el mismo código CDMA que puede ser independientemente modulado por el usuario y combinado para producir un mejoría en la relación S/N. Así, como en la mayoría de las regiones, hasta 4 satélites estarán en constante línea de vista, cuando un usuario envíe o reciba una señal de un satélite podrá beneficiarse de la misma señal de los otros satélites. La señal que arribe a los sistemas receptores de varios satélites y/o múltiples haces dentro del satélite también serán combinadas para proveer a los gateways (también con receptores colectores) una señal de calidad superior a la obtenida con un solo enlace. Cada terminal usa un receptor colector de pendiente para separar las múltiples señales, elegir la mejor y buscar simultáneamente aquella que provenga de una mejor trayectoria. De esta manera aun cuando se empleen enlaces de bajos  $E_b/N_0$  debido a las condiciones de propagación, la calidad del enlace no disminuirá significativamente.

Considerando que las frecuencias en banda L y S son bastante atenuadas por obstrucciones y árboles, la diversidad de trayectoria resulta mucho más adecuada que intentar atravesar los obstáculos proporcionando adicional potencia a la señal transmitida.

5. Suave hand-off- En los sistemas terrestres el hand-off más que ser la regla es la excepción. Sin embargo para los satélites de Globalstar (que viajan a 429 Km/minuto) este proceso se realizará aproximadamente cada 2 o 4 minutos, o aun en periodos menores, cuando los bordes de cobertura de los haces pase sobre los usuarios.

En un sistema celular normal, cada transmisión del haz requiere un comando o conmutación física hacia una nueva frecuencia asignada, donde la terminal conmutada su única señal hacia a la nueva célula sin antes probarla. Esto causa extravío de datos y en algunos casos implica la pérdida de la llamada, sin embargo dicha transferencia es totalmente diferente en un sistema CDMA.

Cuando un gateway comienza a detectar como la potencia procedente de una terminal se acerca hacia el haz adyacente, este comienza a transmitir una copia (desplazada en tiempo) de la misma señal en el nuevo haz o célula. Ello produce que el receptor con pendiente de la terminal, automáticamente rastree ambos haces y opte de manera libre y gradual el realizar el hand-off descartando el enlace que sale del rango de operación.

La misma ventaja se presenta para hand-off entre dos satélites debido a que el receptor detecta simultáneamente la señal de los satélites en línea de vista. Este tipo de hand-off reduce enormemente la carga sobre el gateway, pues el receptor de la terminal actúa independientemente.

Los socios AirTouch Communications, Dacom/Hyundai, France Telecom/Alcatel, Vodafone, Elsasg Bailey y Loral, además de contribuir a la adquisición de una amplia base de usuarios con el aprovechamiento de las capacidades técnicas, de comercialización y de funcionamiento, simplificarán los asuntos regulatorios internacionales, al presentarse como proveedores del servicio Globalstar en 100 países. Estos serán dueños de los Gateways que oscilarán entre US \$2 y US \$5 millones según la capacidad deseada.

### 6.3.2.3 Enlaces de comunicación

Como se ha podido apreciar existen cuatro tipos de enlaces entre los usuarios y los Gateways, que tienen diferentes características. Los parámetros de enlace obviamente están en función de los haces del satélite en los que se ubiquen tanto el usuario como el Gateway. Sin embargo, además de las condiciones atmosféricas y de la posible diversidad de trayectoria, es necesario considerar el factor de interferencia generado por las interferencias mutuas y propias, y por la interferencia esperada según la banda de frecuencias asignada en base a las técnicas de espectro compartido del sistema. También hay que considerar la distribución geográfica de los usuarios, pues esto repercute en la densidad del uso de frecuencias y de códigos, que a su vez determina el nivel de interferencia mutua y la cantidad de potencia requerida para establecer un enlace de comunicación entre el usuario y el Gateway.

Sin embargo, además de los factores mencionados, la capacidad del sistema también depende de los límites regulatorios en la densidad del flujo de potencia (PFD - Power Flux Density) e interferencia con otros sistemas que comparten el espectro, con los cuales debe negociarse un sistema de control mundial para las redes de comunicación, asignando sólo la capacidad necesaria a cada uno.

Por esta razón, no basta un conjunto de ecuaciones para determinar el desempeño de un sistema, pues la mayoría de los elementos que determinan los enlaces previstos son típicamente paramétricos con parámetros interdependientes. Por consiguiente el complejo proceso de asignación debe emplear intensivos cálculos en casi tiempo real, monitoreando continuamente los parámetros del enlace para su eficaz administración dentro del sistema.

Tomando en cuenta todos los posibles deterioros en los enlaces, el diseño del sistema incluye un PIRE y G/T suficientes para un margen común. Dichos recursos son entonces temporalmente utilizados sobre una base trama a trama usando un control de potencia en tiempo real para cada enlace. CDMA permite la transferencia de potencia de un enlace a otro simulando un sistema de amplios recursos sin la necesidad de manejar excesiva potencia para cada enlace de comunicación, y aunque los parámetros característicos enlace varían para cada enlace (según la célula) en una forma dinámica, la tabla 6.11 presenta un simplificado enlace típico.

**Tabla 6.11** Nótese que todos los factores paramétricos susodichos están agrupados en la tabla sobre la línea "otros factores".

Parámetro	Enlace hacia la terminal		Enlace hacia el Gateway	
	Gateway - Sat	Sat - Terminal	Terminal - Sat	Sat - Gateway
Frecuencia nominal, GHz	5	2.5	1.6	7
PIRE/usuario (nadir,claro), dBW	36.4	1.1	-14.3	-33.3
Pérdidas por espacio (nadir,claro), dB	169.7	163.4	159.6	172.3
Otros factores, dB	7.90	1.40	2.10	1.60
G/T (terminal móvil portátil), dB/K	-29.6	-26	-14.25	27.5
Eb/No*, dB	24	5.1	4.5	15.1
Tasa de datos promedio, bps	2400	2400	2400	2400
Beneficios por diversidad, dB			2.2	
Eb/No compuesto, dB		5	6.3	

### 6.3.2.3 Terminales y usuarios

Obviamente, el movimiento relativamente rápido de los satélites causa mayores corrimientos Doppler en la señal que el generado por los sistemas terrestres y por supuesto implican un mayor número de conmutaciones (hand-off) de la señal (entre los haces de cada satélite y entre satélites), sin embargo, bastan ligeras modificaciones en el diseño de las terminales satelitales mediante la tecnología CDMA de Qualcomm para reducir al máximo las inherentes deficiencias del sistema Globalstar. Las principales ventajas que presenta dicha tecnología en la terminal son el diseño del codificador de voz y la presencia de los FECs

Respecto al diseño del codificador de voz. En una conversación de voz full-duplex típica, el ciclo de trabajo promedio de cada voz es de casi entre un 35% y un 40%. Con un sistema CDMA, la tasa de transmisión de datos es reducida cuando hay menor actividad de señales de voz, permitiendo la reducción correspondiente en la potencia de transmisión y en consecuencia disminuir substancialmente la interferencia hacia otros usuarios. Ya que el nivel de interferencia de los usuarios determina la capacidad del sistema, esta última se incrementa en un factor de dos o más y la eficiencia de energía en un factor de tres (nótese que no hay una mejoría equivalente en los sistemas FDMA o TDMA, donde cada señal opera en frecuencias de canal separadas o en ranuras de tiempo separadas y en consecuencia la reducción de la potencia en un canal o ranura no incrementa la capacidad en otros).

El diseño del codificador de voz de Qualcomm usa un intervalo de trama de 20 ms y produce cuatro diferentes velocidades de transmisión de datos las cuales pueden variar cada 20 ms. Las tasas de sistemas terrestres son 9600, 4800, 2400 y 1200 bps (las actuales transmisiones son ligeramente menores debido al overhead -nombre común que designa los diversos factores que impiden obtener el rendimiento ideal u óptimo como los tiempos de arranque y de parada- entre bits). Los resultados preliminares con un mejorado codificador de voz sugieren que Globalstar no requerirá la tasa de 9600 bps., pues la tasa promedio requerida será de sólo 2400 bps. y variará entre trama y trama (al igual que la potencia) según el nivel de actividad vocal (número de fonemas) que registre considerando como criterio enlaces con calidad de realimentación. De esta manera, cuando no registre actividad, la tasa bajará a 1200 bps, lo cual es mucho mejor que recurrir sencillamente a apagar el canal, ya que permite que el canal continúe con una baja tasa de transmisión.

El segundo factor importante que contribuye a la eficiencia de la terminal es el uso de la intercalación (inserta bits para protección) y FECs. Viterbi con máximo umbral de codificación con FEC de tasa  $1/2$ , emplean bloques de longitud 9. Esto permite que la transmisión de potencia decrementa casi 5.2 dB para una tasa de error equivalente sin utilizar en la transmisión dicha codificación<sup>1</sup>.

Globalstar ha suscrito un contrato con Qualcomm Inc., para que este proporcione el diseño, desarrollo y fabricación de 100 terminales de producción previa para abonados. Qualcomm Inc., por su parte, ha otorgado licencia a Orbitel Mobile Communicatios Ltd., para diseñar, desarrollar, fabricar y vender terminales portátiles de Globalstar y para diseñar aparatos de mano de modalidad dual de Globalstar incorporando la tecnología CDMA de QUALCOMM a la tecnología y conocimientos especializados en bases terrestres del Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM) de Orbitel.

Todas las terminales se comunicarán a través de un satélite con el gateway de un proveedor local del servicio Globalstar (de preferencia, aquel con el que tenga suscripción directa con el abonado, en caso de no ser posible, el usuario quedará registrado en el VLR del gateway adecuado) el cual se comunicará a su vez a las redes de telecomunicación (redes telefónicas públicas y celulares) existentes.

1. Terminal para usuarios fijos y semifijos - contienen una pequeña antena y tres PA nominales para proveer robustas capacidades de comunicación. Su operación es muy similar a los teléfonos de sistemas celulares terrestres pero incorporan un microprocesador y software para manejar las funciones únicas de Globalstar, como son los datos de la órbita del satélite. Los microteléfonos operarán con una potencia de salida en el rango de 150 mW a más de un watt para diversas aplicaciones.

---

<sup>1</sup> Una tasa  $1/2$  significa que de dos bits uno es dato y otro obviamente código. El que posea bloques de longitud 9 significa que cada simbolo de código FEC es propagado a lo largo de 9 bits de datos. La intercalación decrementa la vulnerabilidad del enlace ante una ráfaga de errores.

2. Terminal portable - De un tamaño un poco mayor que los teléfonos celulares terrestres, estas disponen de una antena de sofisticado diseño para proveer cobertura de horizonte a horizonte (permitiendo un mayor movimiento de la cabeza evitando el bloqueo por obstrucciones por encima de la cabeza del usuario). Las pruebas iniciales sugieren que la antena puede proveer de 1 a 1.5 dB de ganancia, lo cual representa un buen desempeño dada la cobertura requerida y el estrecho o limitado diseño. La potencia de salida promedio estará en el rango de miliwatts, con capacidad para potencia pico de 600 mW. La vida de la batería excede las 2 horas en continua actividad de la voz y 15 horas para stanby. La terminal también incluye las funciones únicas de Globalstar, un localizador de posición y un módulo SIM incorporados. Adicionalmente, existirán versiones de operación dual y un paquete para auto que incorporará un amplificador de potencia y una antena transmisora.

Las terminales móviles portátiles tendrán un costo de USD \$750 y las cabinas telefónicas públicas oscilarán entre USD \$1000 y USD \$2500; dependiendo en estas últimas la capacidad deseada y el número de unidades que comparten una antena fija. Como es el caso de muchos sistemas celulares actuales, los proveedores de servicios pueden subsidiar algunos o todos los elementos del costo del sistema, en particular en áreas rurales, reduciendo de esta forma el costo de acceso a los abonados.

Globalstar espera en base a proyecciones de necesidad y capacidad de pago (principalmente en países en desarrollo) sobrepasar los 30 millones de abonados potenciales, ofreciendo bajas tarifas que proyectan ser de entre USD \$0.35 y USD \$0.53 por minuto. Además, los proveedores del servicio podrán tener acceso a precios más bajos si las metas en abonados o ganancias son superadas o, en ciertos casos, como reacción a propias normas de reducción en los precios minoristas así como en otras formas de reducción con vista a penetrar mercados específicos o enfrentar futura competencia.

### 6.3.3 ORBCOMM (ORBital COMMunications)

El sistema Orbcomm es un sistema satelital pequeño de órbita baja (little LEO) autorizado por la FCC desde 1993, para proveer servicios de radiodeterminación, así como de transmisión bidireccional de datos y de mensajes alfanuméricos cortos utilizando un protocolo de conmutación de mensajes (almacenamiento y envío).

#### 6.3.3.1 Constelación Satelital

Inicialmente, Orbcomm planeaba operar sobre una constelación de cuatro planos principales y dos complementarios, sin embargo en un estudio posterior se optó por el uso de sólo tres de los cuatro planos principales, los cuales emplean órbitas circulares inclinadas a  $45^\circ$ , situadas a una altitud de 775 Km, las cuales alojan individualmente a ocho satélites activos separados entre sí por  $45^\circ$ ;  $5^\circ$ . Adicionalmente, los dos planos complementarios son órbitas circulares cuasipolares de  $70^\circ$  de inclinación a 740 Km de altitud en las que se prevén un total de cuatro satélites activos (dos por órbita) de igual constitución al resto de la constelación (figura 6.24). De esta manera, la constelación espera ser integrada por un total de 28 satélites MicroStar desarrollados por Orbital, principal inversionista.

Con la intención de adquirir experiencia para el desarrollo de la totalidad del sistema y basándose en que al ofrecer dicho servicio antes que ningún otro pequeño sistema LEO aumenta la viabilidad para la licitación internacional, Orbcomm comenzó a proveer su servicio en los Estados Unidos desde febrero de 1996 mediante sólo dos satélites situados en una de las órbitas cuasipolares y cuatro estaciones terrenas.

Al igual que otros sistemas little LEO como Starsys y Global Positioning, los satélites Orbcomm operan dentro de la banda de frecuencias VHF, asignada en la WRC-92:

- 148.0 - 149.9 MHz enlaces de subida
- 137.0 - 138.0 MHz enlaces de bajada

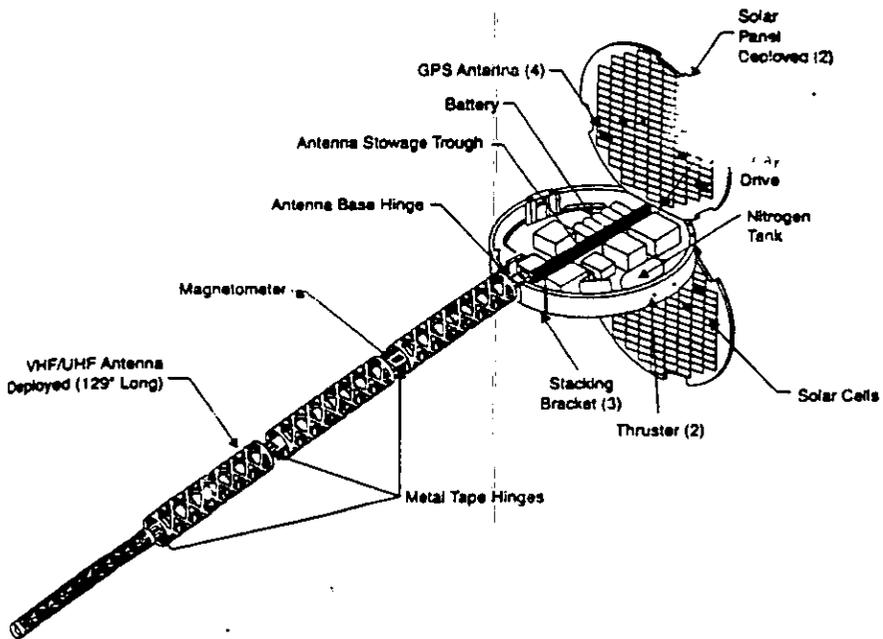


**Figura 6.24** Configuración de la constelación del sistema Orbcomm. (Cortesía de ORBCOMM Global L.P.)

Las señales de 5 volts transmitidas por los usuarios y las estaciones terrenas son retransmitidas hacia la tierra limitadas a  $-125 \text{ dB (W/m}^2/4 \text{ KHz)}$  en el flujo de potencia de transmisión (PDF), a través de los canales administrados y controlados por una computadora a bordo que emplea un sistema de asignación dinámica de canal (DCAAS- Dynamic Channel Activity Assignment System) desarrollado por Orbcomm, el cual continuamente busca el espectro autorizado, identifica las frecuencias en uso y asigna cada 5 o 15 segundos un canal de acceso aleatorio procurando minimizar la posibilidad de interferencia.

Adicionalmente, los satélites transmiten sin límite en PDF hacia los usuarios, una señal en  $400.1 \text{ MHz } (\pm 25 \text{ KHz})$  que sirve para el servicio de radiodeterminación.

El diseño y la implementación de Orbcomm (figura 6.26), estimada en USD \$ 354 millones, ha sido otorgada principalmente a Orbital (USD \$ 163 millones), principal inversionista, el cual desarrolló los dos satélites y las cuatro estaciones activas a la fecha (figura 6.25), y proveyó durante la fase inicial los primeros 34 satélites del sistema así como el lanzamiento de 24 de ellos, de los cuales los primeros cuatro fueron ya lanzados dentro de la carga secundaria de dos cohetes Taurus con capacidad de 1,360 Kg, y el resto está siendo lanzado periódicamente en grupos de 8 a bordo de lanzadores Pegasus XL con capacidad de 453.6 Kg. Además, Orbital proveyó soporte para supervisión de los satélites hasta 20 días posterior a la fecha de lanzamiento.



**Figura 6.25** Con casi 5 años de vida útil, los satélites orbcomm de aproximadamente 43 Kg, diámetro de 1m y 6.5 cm de altura, poseen dos paneles solares de 4.31 x 2.23 m ya desplegados, que proveen la alimentación a un sistema de potencia de 14 volts que a su vez abastece al equipo de electrónica digital mediante una línea regulada a 5 volts. (Cortesía de Orbital Communications Corporation.)

# ORBCOMM™

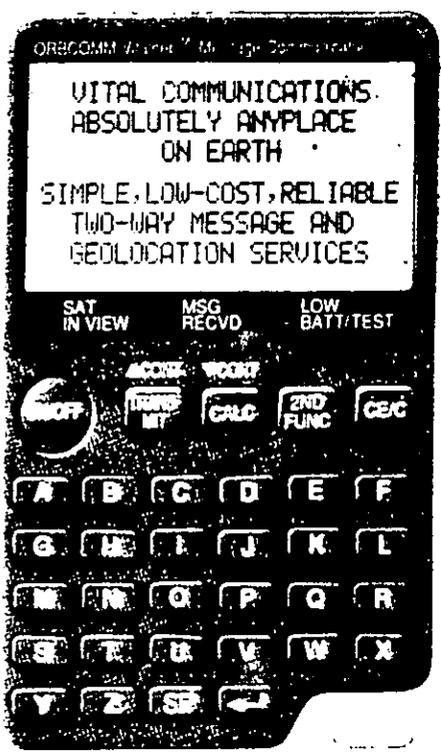


Figura 6.26 Equipo integral del sistema Orbcomm. (Cortesía de ORBCOMM Global L.P.)

No obstante que dicho lanzador, tuvo fracasos significativos en sus primeros dos vuelos uno por problemas en el diseño aerodinámico y otro por errores humanos de ensamblado, Orbcomm decidió el empleo de dicho lanzador debido a que posterior a dichos desastres, Orbcomm solicitó a la NASA, a la fuerza aérea de los E.U.A., a the Ballistic Missile Defense Organization y a the Aerospace Corporation, un extenso análisis de ingeniería y un subsistema de pruebas para conocer las características de vuelo e implementar los apropiados cambios en el diseño. Como resultado surgieron 88 cambios que fueron realizados por expertos en industria espacial. Finalmente a partir de marzo de 1996 Pegasus XL reinició sus vuelos (el problema relativo a la separación de los satélites de la NASA aún está bajo análisis, pues Pegasus XL no había presentado problemas en tal subsistema).

### 6.3.3.2 Segmento terrestre

Como se aprecia en la figura 6.26, el segmento terrestre consta de un centro de control de red, un centro de control satelital, gateways y terminales. Los gateways están situados alrededor del mundo, formando redes multinodos estándar que operan bajo el protocolo X.400 utilizando tecnología TDMA con el fin de reducir los riesgos tecnológicos. Dichos gateways incluyen un sistema de conmutación de mensajes, un sistema de control, y una estación terrena de operación autónoma para los enlaces con los satélites que integra fuentes de combustible y de energía eléctrica para su funcionamiento, así como dos antenas a través de las que transmite un haz único. Las antenas, de las cuales una sirve como respaldo, están cubiertas por estructuras de 1 m de altura de diámetro aproximado 0.8 m y 1,500 Kg peso. Aunque los gateways pueden tener en su mayoría equipo para propósitos de comando y control de segmento satelital, se requiere que dichos procesos los realice el centro de control satelital debido a lo convenido por la FCC.

Mediante las terminales del sistema Orbcomm, el usuario crea un texto usando el teclado integrado de la mayoría de las terminales, o una computadora o un dispositivo comunicador de abonado (Subscriber Communicator device).

Dicho mensaje (de longitud típica entre 6 y 250 bytes) es enviado a 2400 bps (los mensajes son recibidos a 4800 bps y en un futuro a 9600 bps) hacia el satélite más cercano <sup>1</sup> y retransmitido hacia un gateway, en donde es procesado usando una el software desarrollado por Orbcomm y el utilizado por e-mail comercial para ser dirigido hacia su destino (es posible el uso de mensajes con acuse de recibo).

El destinatario del mensaje puede ser otro comunicador de abonado, o alguna red de datos públicas o privadas que emplee interface X.25, Internet o aun un dispositivo convertidor texto/fax (facsimil). Las terminales o comunicadores en general son:

- Comunicadores para el monitoreo unidades vehiculares así como de su subsistemas y estado de la carga.
- Comunicadores con potencia externa que pueden emplearse en aplicaciones de monitoreo y control remoto.
- Comunicadores con baterías o paneles solares propios para proveer comunicaciones en zonas que carezcan de energía y de líneas telefónicas.

Adicionalmente, se están diseñando sensores e interfaces que permitan un amplio rango de aplicaciones a control remoto, otras más que integren receptores de GPS y otras tantas que manejen pantallas con menús sensibles al tacto, similares en funcionamiento a las terminales OmniTRACs pero obviamente mucho más pequeñas.

Una típica terminal Orbcomm actual, puede enviar y recibir mensajes de 150 caracteres alfanuméricos, mismo que despliega en su pantalla LCD de 144 caracteres. Cuenta con servicio de determinación de posición con una exactitud de casi 100 m., también dispone de memoria para diez mensajes que pueden ser desplazados a selección, y una interface externa para computadora y cuatro funciones de cálculo, abasteciéndose mediante baterías de larga vida y de una antena de látigo para la su operación.

Finalmente, se llega a la conclusión que las terminales Orbcomm para el servicio personales no voz resultan de menor costo que las propuestas de otros sistemas big LEO. Esto se debe principalmente: a que los satélites requieren menor potencia al operar en una banda adecuada para el servicio que es menos atenuada por el medio que la banda L y S, a que el diseño de los mismos elimina un número de costosos y complejos subsistemas necesarios en los grandes LEO mencionados anteriormente, tales como la antenas de haces puntuales, el procesamiento a bordo, y los amplificadores de alta potencia, todos ellos indispensables para la comunicación de voz, vídeo y elevado tráfico de datos.

Lo anterior, permite reducir aún más el tamaño del artefacto LEO, su costo y tiempo de producción así como incrementar el número de satélites en cada lanzamiento. Singularmente, el uso de protocolos de conmutación por paquetes aumenta la capacidad del sistema evitando como en el caso de Iridium y Globalstar disponer de circuitos especiales adicionales para proveer dicho servicio, ya que el disponer de forma permanente o semipermanente un circuito orientado para voz, incrementaría el costo de los mensajes cortos.

Hoy en día, Orbcomm se encuentra en constante actividad de negociación para poder servir en todo el mundo, actualmente mantiene acuerdo con más de 38 países alrededor del mundo y está en vía de convenir un arreglo con la mayoría del continente europeo. También está cuestionando la posibilidad del lanzamiento de ocho satélites activos más, en el cuarto plano asignado para formar una constelación de 36 satélites que aumente la confiabilidad del servicio, que sirviéndose de 28 satélites, sería de 95 % para latitudes similares a la de los Estados Unidos de Norteamérica y 75 % para zonas ecuatoriales. En un futuro Orbitel provera por USD \$ 166.1 millones un reabastecimiento de 32 satélites considerando el uso de cohetes Taurus o Pegasus XL para su colocación en órbita, dicha elección deberá ser determinada antes del 12 de septiembre del presente año y la diferencia no deberá exceder los 21 millones de dólares.

## CONCLUSIONES

---

Como pudo apreciarse en el primer capítulo, los satélites proveen una mucho mayor cobertura que los sistemas celulares terrestres, sin embargo a pesar de que estos últimos podrán facilitar una extraordinaria extensión los primeros, no sustituirán la comunicación celular terrestre debido a dos principales factores:

- El primero es un impedimento parcial, resultado del conjunto de cargos que implicará el servicio, pues aunque los enlaces entre terminales son comunes, la mayor parte del tráfico será generado por y hacia las redes terrestres públicas y celulares, las cuales cobrarán al abonado que llama, la porción relativa al uso del segmento espacial (el cual se pagarán al sistema satelital considerando una adicional tarifa de liquidación) y el costo por interconexión (considerado típicamente como de larga distancia) más una ganancia extra. De esta manera aunque el costo por uso satelital disminuya al aumentar la demanda, el costo del servicio nunca será inferior al de los sistemas terrestres debido al proceso de interconexión y ganancia de los sistemas involucrados, excepto obviamente, para los enlaces entre terminales móviles.
- El segundo y principal factor, se debe al hecho de que una comunicación satelital requiere enlaces en línea de vista, los cuales a causa de la distancia y el nivel de potencia implícitos (tanto por la capacidad de las terminales como por los estándares de seguridad para la salud del usuario) no podrán acceder a usuarios situados en el interior de un edificio, salvo si estos se encuentran cerca de una ventana.

Respecto a la configuración de los diversos sistemas satelitales, podemos resaltar cómo los sistemas geoestacionarios además de estar limitados por la congestión en las latitudes orbitales de mayor importancia, presentan notables desventajas en la eficiencia de cobertura, en primera instancia por la falta de línea de vista con las zonas polares terrestres, pero principalmente por el conjunto de características de propagación que limitan el reuso de frecuencias (aun con antenas MBA las células son muy grandes), la portabilidad de las terminales (debido a la potencia del enlace) y la capacidad de los servicios de telefonía (grandes retardos), obligando así a ser fundamentalmente orientados como sistemas satelitales de baja densidad de enlaces simultáneos y servicios de comunicación de alta capacidad mediante terminales pseudo portátiles como Inmarsat B, C y M, o como sistemas que aprovechan su cobertura individual para comunicaciones intercontinentales, donde el retardo de transmisión puede incluso ser menor que el generado por los saltos o ISL implícitos en los sistemas MEO y LEO.

Este último aspecto también es ampliamente aprovechado por pagers y terminales de uso similar como Inmarsat D y E. No obstante Orbcomm constituye el excelente candidato cuando dichas terminales son requeridas a nivel nacional debido a que el retardo de comunicación, las dimensiones de la terminal, y el costo del servicio resultan inferiores a la mayoría de los sistemas propuestos.

En cuanto concierne a los sistemas satelitales de órbitas bajas e intermedias para comunicaciones intercontinentales con servicio de telefonía y terminales personales, resulta ideal el uso de ICO o bien, de Iridium dentro de los sistemas de órbita baja, pues este último presenta equipo para ISLs que reducen significativamente el retardo como se manifestó en el capítulo cinco, y además debido a la cercanía de la órbita es obvio que sus satélites permiten el uso de terminales más pequeñas y menos potentes que las de sistemas MEO y aún más que aquellas utilizadas para sistemas GEO.

La diferencia esencial de los sistemas MEO y LEO en cuanto a la capacidad del sistema, radica en la densidad de enlaces de comunicación dentro de una región. En tal aspecto, los sistemas LEO presentan nuevamente una notable ventaja, pues al estar más cerca de la superficie terrestre hacen un reuso más eficiente del espectro de frecuencias en zonas de cobertura mucho menores, en especial si se emplean sistemas con tecnología CDMA, como es el caso de Globalstar que en base a ello reduce significativamente el costo de su servicio, mismo que disminuye a falta de procesamiento a bordo que permite un sencillo diseño de sus satélites.

Adicionalmente a la eficiencia de la cobertura, se suma la diversidad en la trayectoria del enlace, en este sentido, los sistemas LEO y MEO expuestos proporcionan un alto índice de seguridad en la continuidad del enlace en zonas de latitud inferiores a los 70°, en las cuales el sistema Globalstar supera al resto al disponer del uso de tecnología CDMA de Qualcomm que permite tanto en las terminales como en los Gateways, utilizar receptores capaces de integrar las señales recibidas por los diferentes satélites en línea de vista para formar una señal de mejor calidad (resulta más efectiva la diversidad de trayectoria que el incremento en la potencia del enlace debido a las atenuaciones por obstrucciones en banda L y S), y a la vez facilita el proceso de hand-off del enlace de comunicación entre las células del satélite y entre los diversos satélites.

Por su parte, Iridium provee la mayor diversidad de trayectoria en las zonas polares terrestres debido a que su constelación está basada en órbitas cuasipolares que incluso implican que sus satélites desactiven temporalmente en dichas regiones varios de sus enlaces de comunicación e ISLs a causa de la congestión que se presenta. Es por ello que en base a la numerosa cantidad y al difícil mantenimiento en órbita de sus satélites (debido a su altitud experimentan múltiples perturbaciones) Iridium hace uso de la tecnología FDMA/TDMA ampliamente conocida e implementada, evitando complicar aún más el diseño de sus satélites.

Aunque las constelaciones LEO implican un elevado número de satélites para disponer de una cobertura global, el cual debe ser reabastecido en períodos de menos de 8 años (a diferencia de los satélites MEO y GEO diseñados para un tiempo de vida de casi 15 años) debido al consumo del combustible a causa de las perturbaciones en órbita, estos permiten su construcción en serie en períodos tan cortos como 5 días, eliminando substancialmente dicha desventaja. Por otro aspecto, la dificultad en la implementación de su constelación es sólo relativamente mayor a la de sistemas MEO, pues estos emplearán tecnología ya probada e incluso en algunos casos, utilizada por sistemas satelitales en operación actual.

De esta manera, podríamos decir que severas pruebas de aceptación de dichos sistemas satelitales, están presentándose de manera análoga a la situación de los primeros satélites de comunicación móvil expuesta en el segundo capítulo de la tesis, donde se mencionó que aun no habiendo un servicio eficiente para las comunicaciones puerto-barcos, y existiendo la necesidad del mismo, el sistema tuvo a bien rebasar las expectativas de los escépticos para iniciar una revolución en el ámbito de las comunicaciones móviles.

No obstante, pese a dicha polémica, se augura que una vez que el mundo actual haya aceptado la operación de los sistemas de órbitas bajas e intermedias, a principios del próximo año, simultáneamente se estará iniciando la implantación de sistemas multisatelitales que mejoraran la eficiencia de cobertura al proveer un grado adicional de libertad mediante el uso de constelaciones de dos o más niveles orbitales (siendo particularmente efectiva la combinación de satélites LEO y GEO debido a que estos implican las demandas extremas en comunicación móvil mundial) basados en el uso de enlaces ISL de avanzada tecnología, principalmente en la banda de frecuencias ópticas.

Actualmente ya se están llevando a cabo pruebas sobre dicho tipo de ISL e inclusive existen ya las primeras implementaciones de algunos proyectos satelitales de este tipo, siendo el proyecto SILEX (Semiconductor Intersatellite Laser Experiment) desarrollado por la ESA, el sistema de mayor avance a la fecha (véase el artículo: Shlomi Arnon, "Laser Satellite Communication Network - Vibration Effect and Possible Solutions", Proceedings of the IEEE, Vol. 85, No. 10, Octubre 1997.)

Finalmente, podemos concluir mencionando la posible implementación de sistemas de banda ancha en órbitas medias y bajas (basados en los experimentos realizados a bordo del satélite ACTs de la NASA), afirmando así, la enorme revolución que representará la operación de los sistemas orbitales analizados, los cuales sin duda alguna formarán parte esencial en las redes de tercera generación que permitirán comunicaciones móviles personales con cobertura global mediante el uso de terminales portátiles con número universal de identificación de abonado capaces de acceder cualquier tipo de red existente.

## GLOSARIO DE ABREVIATURAS

---

<b>ACT</b>	<b>Attitude Control System</b>	Sistema de control de orientación
<b>ACTS</b>	<b>Advanced Communication Technology Satellite</b>	Satélite de tecnología de comunicaciones avanzada
<b>AMSC</b>	<b>American Mobile Satellite Corp.</b>	Corp. Americana de Satélites Móviles
<b>ARQ</b>	<b>Automatic Repeat Request</b>	Código de solicitud de retransmisión automática al detectar un error.
<b>BER</b>	<b>Bit Error Rate</b>	Tasa de probabilidad de bits erróneos
<b>BPSK</b>	<b>Binary Phase Shift Keying</b>	Modulación de desplazamiento de fase binario (PSK de dos fases)
<b>BWHP</b>	<b>BandWidth Half Power</b>	Ancho de banda a potencia media.
<b>CDMA</b>	<b>Code Division Multiple Access</b>	Acceso múltiple por división de código
<b>CGS</b>	<b>Control Ground Station</b>	Estación terrena de control
<b>CONUS</b>	<b>CONTinental US</b>	Area continental de los E.U.A.
<b>ES</b>	<b>Earth Station</b>	Estación terrena
<b>FCC</b>	<b>Federal Communications Commission</b>	Comisión Federal de Comunicaciones
<b>FDM</b>	<b>Frequency Division Multiplex</b>	Multiplexaje por división en frecuencia

<b>FDMA</b>	<b>Frequency Division Multiple Access</b>	Acceso por división en frecuencia
<b>FEC</b>	<b>Forward Error Correction</b>	Técnica de codificación para corrección de errores sin opción de re-envío.
<b>FET</b>	<b>Field Effect Transistor</b>	Transistor de efecto de campo
<b>FM</b>	<b>Frequency Modulation</b>	Modulación en frecuencia (Frecuencia modulada)
<b>FSK</b>	<b>Frequency Shift Keying</b>	Modulación con cambio de frecuencia
<b>GEO</b>	<b>Geostationary Earth Orbit</b>	Orbita terrestre geostacionaria
<b>GPS</b>	<b>Global Positioning System</b>	Sistema de posicionamiento global
<b>G / T</b>	<b>Gain to Noise temperature ratio</b>	Relación de ganancia a temperatura de ruido (factor de calidad)
<b>HF</b>	<b>High Frequency</b>	Frecuencia Alta (3 - 30 MHz)
<b>HPA</b>	<b>High Power Amplifier</b>	Amplificador de alta potencia
<b>IF</b>	<b>Intermediate Frequency</b>	Frecuencia intermedia (FI)
<b>INMARSAT</b>	<b>INternational MAritime SATellites</b>	Satélites Marítimos Internacionales
<b>ISI</b>	<b>Inter-Symbol Interference</b>	Interferencia entre símbolos (digitales)
<b>ISL</b>	<b>Inter-Satellite Link</b>	Enlace intersatelital
<b>ITU</b>	<b>International Telecommunications Union</b>	Unión Internacional de Telecomunicaciones
<b>LEO</b>	<b>Geostationary Earth Orbit</b>	Orbita terrestre baja
<b>LNA</b>	<b>Low Noise Amplifier</b>	Amplificador de bajo ruido
<b>MEO</b>	<b>Medium Earth Orbit</b>	Orbita terrestre intermedia
<b>MSS</b>	<b>Mobile Satellite Service</b>	Servicio móvil por satélite
<b>MTSO</b>	<b>Mobile Telephone Switching Office</b>	Oficina de Conmutación de Telefonía Móvil

<b>NBFM</b>	<b>NarrowBand Frequency Modulation</b>	Modulación en frecuencia en la que se utiliza sólo una banda angosta del espectro modulado
<b>PCM</b>	<b>Pulse Code Modulation</b>	Modulación por pulsos codificados
<b>PIRE (EIRP)</b>	<b>Equivalent Isotropic Radiated Power Satellite</b>	Potencia isotrópica radiada equivalente (o efectiva)
<b>PSK</b>	<b>Pulse Code Modulation</b>	Modulación por pulsos codificados
<b>PSTN</b>	<b>Public Switched Telephone Network</b>	Red de conmutación de telefonía pública
<b>PTT</b>	<b>Posts, Telephone and Telegraph</b>	Administración de Correos, Telégrafos y Teléfonos.
<b>QPSK</b>	<b>Quaternary Phase Shift Keying</b>	Modulación PSK de cuatro fases
<b>RDSS</b>	<b>Radio Determination Satellite Service</b>	Servicio de radiodeterminación por satélite
<b>SPL</b>	<b>Sound Pressure Level</b>	Nivel de presión del sonido
<b>SSB</b>	<b>Single Side Band</b>	Transmisión en banda lateral única
<b>SSMA</b>	<b>Spread Spectrum Multiple Access</b>	Acceso múltiple con espectro disperso (diferenciación de código)
<b>SSPA</b>	<b>Solid-State Power Amplifier</b>	Amplificador de potencia de estado sólido
<b>SS/TDMA</b>	<b>Satellite Switches Time Division Multiple Access</b>	Acceso múltiple por división en el tiempo con conmutación en el satélite
<b>TDM</b>	<b>Time Division Multiplex</b>	Multiplexaje por división en el tiempo
<b>TDMA</b>	<b>Time Division Multiple Access</b>	Acceso múltiple por división en el tiempo
<b>TT&amp;C</b>	<b>Telemetry, Tracking and Command</b>	Telemetría, rastreo y comando (control)
<b>TWT</b>	<b>Traveling Wave Tube</b>	Tubo de ondas progresivas

<b>TWTA</b>	<b>Traveling Wave Tube Amplifier</b>	Amplificador con tubo de ondas progresivas
<b>UHF</b>	<b>Ultra High Frequency</b>	Frecuencia ultra alta (0.3 - 3 GHz)
<b>VHF</b>	<b>Very High Frequency</b>	Frecuencia muy alta (30 - 300 MHz)
<b>VLSI</b>	<b>Very Large Scale Integrated circuit</b>	Circuito integrado de alta escala
<b>WARC</b>	<b>World Administrative Radio Conference</b>	Conferencia mundial para la administración del espectro de radiofrecuencias

## BIBLIOGRAFIA

---

Ackroyd, Brian; *World Satellite Communications and Earth Station Design*. Oxford, BSP Professional. 1990.

Bruce Gerding. Personal Communications via Satellite: An overview.. febrero 1996.

CALIFORNIA MICROWAVE, Soluciones Totales Para Infraestructuras Inalámbricas, folleto, 1996.

Fourth International Conference on Satellite Systems for Mobile Communications and Navigation. IEE & INMARSAT, octubre 1988.

Globalstar Backgrounder updated to 1/13/97.

Globalstar System, 1997

Globalstar Technology. U.S.A.. San Jose California. 1995.

Hirshfield Edward. The Globalstar System. verano de 1995.

HUGHES. MORELOS, " El Primer Satélite Nacional de México ". folleto. HSC. noviembre 1993.

HUGHES. SOLIDARIDAD, " Tecnología Avanzada para México ", folleto. septiembre 1993.

ICO. Annual report 1996

ICO. The Global Communications Magazine

INMARSAT, " Communications unlimited ", U.K.. 1995.

INMARSAT, " FACS ", enero 1997.

INMARSAT, Panel of experts on the establishment of a legal framework with regard to GNSS. " Inmarsat-3 and Augmentation of a Primary Signals ". 25-30 noviembre 1996.

INMARSAT, Inmarsat - phone. "Aquí y ahora ", folleto., U.K.. septiembre 1996.

INMARSAT, Proyect 21, " The Developmente of Personal Mobile Satellite Communications ". folleto. U.K., 1994.

Iridium. Background information. Iridium LLC

Iridium. Servicios Globales

Iridium. Teléfonos Kyocera y Motorola, Pager Motorola. Iridium LLC

Iridium Today. Global Wireless Telecommunication, Vol. 4. número 1, octubre 1997.

Lee .William C.Y.: *Mobile Cellular Telecommunications Sustrms*. Mc Graw-Hill, 1989.

Logsdon. Tom: *Mobile Communication Satellites*. Mc Graw-Hill. 1995.

- Lockheed Martin Telecommunications. Communications Solutions. " Intelsat and Inmarsat - High Profile Telecommunications Customers for Eorld Satellite Systems ", agosto 1996.
- Maral G., Bousquet M., *Satellite Communications Systems - Systems, Techniques and Technology*, 2nd edition, John Wiley & Sons Ltd., 1993.
- Martín, James: *Communications Satellite Systems*. Prentice Hall, 1978.
- Miller J. Michael, Branka Vucetic, Les Berry. *Satellite Communications - Mobile and Fixed Services*. Kluwer Academic Publishers, 1993.
- MOTOLOLA, DPC550 M, folleto. E.U.A., 1996.
- Neri Vela R., *Satélites de Comunicaciones*, Mc Graw-Hill, noviembre 1989.
- OmniTRACS, OmniTRCAS, " Comunicación y Localización Vía Satélite ", folleto. México D.F., 1996.
- QUALCOMM, OmniTRACS. " The Complete Satellite System ". folleto. San Diego, California. E.U.A., marzo 1996.
- QUALCOMM. Resumen corporativo de la compañía QUALCOMM, folleto, San Diego, California. E.U.A., 1997.
- Schindal Joel. Concep and implementation of the Globalstar Mobile Satellite System.
- Spar Aerospace Ltd., Where space is just the beginning, " Spar and the Future Of Spacecraft Manufacture - Building Partnerships for Prosperity ", febrero 1994.
- TELECOMM, INMARSAT, folleto, México D.F., 1997.
- TELECOMM, INMARSAT. " International Mobile Satellite Organization ", folleto, 1997.
- TELECOMM, "Sistema de Satélites Mexicanos Solidaridad - Manual Técnico ", versión preliminar, 6a edición, México, marzo 1995.
- TELECOMM, Sistema de satélites Solidaridad, " Lanzamiento del satélite Solidaridad 2 ", octubre 1994.
- TELECOMM, MOVISAT Datos, MOVISAT Voz, RURALSAT, julio 1996.
- TMI Communications. " MSAT - Comunicaciones móviles por satélite ", folleto. Canadá, 1996.
- TMI Communications, MSAT. " Phone Service ", " Mobile Phone Service ", "Dispatch Radio Service ", " Packet Data Service ", " Communicator - Narrowband RST 2000 ", " Communicator - Mitsubishi DiamondTel Series ", " Communicator - Westinghouse SERIES 1000 ", folletos. Canadá 1995.
- TRW Space & Electronics Group " Odyssey System Overview ", febrero 1996.
- Wilbur L. Pritchard, Joseph A. Sciulli, *Satellite Communications System Engineering*, Prentice Hall, 1986.
- William W., Edward F. Miller, Willbur L. Pritchard, Raymond L. Pickholtz, " Mobile Communications ". Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No. 9, septiembre 1994.
- Westinghouse Mobile Satellite Communications. " Sistema Telefónico Móvil por Satélite SERIE 1000 ", " SERIES 1000 Marine Satellite Telephone System ", folletos. U.S.A., 1996.
- Westinghouse Wireless Solutions Company. " SERIES 1000 Mobile Satellite Telephone System ", U.S.A., 1996.