



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Comparación Técnico-Económica  
de los satélites Satmex 5 y Satmex 6**

**T E S I S**

**Que para obtener el título de:**

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**P r e s e n t a n**

**Julieta Carmona Silva  
Álvaro Francisco Rojas Martínez**

**Director de Tesis: Dr. Salvador Landeros Ayala**



**México, D.F. agosto de 2004**

# ÍNDICE

CAPÍTULO	PÁGINA
<b>1 Introducción</b>	1
1.1 Breve explicación del trabajo	1
<b>2 Técnicas de acceso múltiple</b>	9
2.1 Técnicas de acceso múltiple	9
2.1.1 Acceso múltiple por distribución de frecuencia (AMDF o FDMA)	11
2.1.2 Acceso múltiple por distribución en el tiempo (AMDT o CDMA)	12
2.1.3 Acceso múltiple por diferencia de código (AMDC , CDMA o AMEE)	15
<b>3 Características técnicas del satélite Satmex 5</b>	17
3.1 Subsistemas de Satmex 5	17
3.1.1 Antenas	17
3.1.2 Comunicaciones	22
3.1.3 Energía eléctrica	30
3.1.4 Control térmico	35
3.1.5 Posicionamiento y orientación	37
3.1.6 Propulsión	41
3.1.7 Rastreo telemetría y comando	49
3.1.8 Estructural	51
<b>4 Comparación técnico-económica entre Satmex 5 y Satmex 6</b>	54
4.1 Subsistemas de Satmex 6	54
4.1.1 Antenas	55
4.1.2 Comunicaciones	56
4.1.3 Energía eléctrica	58
4.1.4 Control térmico	58
4.1.5 Posicionamiento y orientación	59
4.1.6 Propulsión	59
4.1.7 Rastreo telemetría y comando	59
4.1.8 Estructural	59
4.2 Comparación técnica entre Satmex 5 y Satmex 6	60
4.3 Comparación económica entre Satmex 5 y Satmex 6	69

<b>5 Cálculos de enlace</b>	71
5.1 Conceptos básicos para el enlace	71
5.1.1 Ángulos de elevación y azimut	71
5.1.2 Rango	72
5.1.3 Efecto Doppler	72
5.1.4 Atenuación por absorción atmosférica	73
5.1.5 Atenuación por lluvia	74
5.1.6 Efectos de la Troposfera	75
5.1.7 Efectos de la Ionosfera	76
5.2 Configuración del enlace	76
5.3 Densidad de flujo, PIRE y atenuación en el espacio libre	80
5.4 Pérdidas y ruidos en el enlace	82
5.5 Figura de mérito y densidad de flujo de saturación	86
5.6 Potencias	88
5.7 Ejemplos de cálculo de enlace para Satmex 5 y Satmex 6	89
Anexos del capítulo 5	102
<b>6 Costos de los dos satélites</b>	115
6.1 Situación económica de Satmex	115
6.2 Generalidades de construcción y pruebas	117
6.3 Costos de fabricación y lanzamiento de los satélites Satmex 5 y Satmex 6	118
6.3.1 Costo de Satmex 5	118
6.3.1.1 Método TFU para calcular el costo de Satmex 5	119
6.3.2 Costo de Satmex 6	125
<b>7 Perspectivas técnicas para Satmex 7</b>	127
7.1 Tecnologías en el mundo	128
7.1.1 Sistemas que ofrecen servicio fijo	128
7.1.2 Satélites de banda ancha	129
7.1.3 Satélites de servicio móvil de banda angosta	131
7.1.4 Sistemas de radio digital	132
7.1.5 Enlaces entre satélites (ISL)	136
7.2 Posibles implementaciones en los próximos satélites mexicanos	137
7.2.1 Sistemas microelectromecánicos (MEMS)	137
Conclusiones	145
Bibliografía	148

## INTRODUCCIÓN

El hombre desde los albores de la humanidad siempre ha mirado el cielo con una mezcla de admiración y temor. Hoy en día el cielo está habitado por máquinas que, impasibles y desde la enorme ventaja que les reporta la altitud en la que se mueven, intentan con su funcionamiento hacer nuestra vida lo mas llevadera posible. En la actualidad la variedad de satélites artificiales que rodean la tierra es sorprendente, sin embargo, los Satélites de Comunicaciones son en los que nos enfocaremos para este proyecto. Dentro de esta categoría existen variantes, pero los geoestacionarios son los más importantes y de mayor uso en la actualidad.

En general todos los satélites funcionan bajo el mismo principio y constan de varias partes comunes, independientemente de su objetivo en órbita alrededor de la Tierra. Desde luego que si hay algunas diferencias fundamentales entre ellos, pero de cualquier forma todos necesitan, por ejemplo, una buena cantidad de celdas solares para alimentarse de energía, antenas para transmitir su información y también para poder recibir instrucciones o cualquier otro tipo de señales, así como medios de propulsión para corregir su órbita, posición u orientación con respecto a la Tierra.

Los satélites han ido madurando en potencia, capacidad y vida útil, y además de las tradicionales bandas C y Ku, el uso de la banda de frecuencias Ka, que tiene un mayor ancho de banda que las otras dos juntas, es ya una realidad y tiene un gran potencial para servicios digitales multimedia de muy alta velocidad.

Todo lo anterior y algunos avances tecnológicos como celdas solares de arseniuro de galio, antenas parabólicas perfiladas y de arreglos activos con control de fase, propulsión eléctrica y sistemas digitales de procesamiento hacen al estudio de los satélites un área muy extensa e interesante. Además, económicamente los satélites se pueden ver como un negocio de billones de dólares.

El contenido de cada uno de los capítulos de la tesis se resume en los siguientes párrafos.

En el capítulo 1 se definen algunos conceptos generales de los satélites como los diferentes tipos que existen, posteriormente veremos que los satélites mexicanos corresponden al tipo de los geoestacionarios, utilizados para comunicación por las ventajas que ofrecen sus características, además se resume la evolución del sistema satelital mexicano y el objetivo de este trabajo.

En el capítulo 2 se explican de manera general las técnicas de acceso múltiple más comunes que utilizan los satélites para realizar un enlace, aquí se describen las características de AMDF, AMDT y AMDC , así como sus principales diferencias.

El capítulo 3 describe las características particulares del Satmex 5 , se analizan uno por uno los subsistemas que lo componen de forma resumida, pero considerando los conceptos más importantes para la finalidad de este trabajo, de modo que posteriormente podamos realizar una comparación con Satmex 6.

En el capítulo 4 describimos un poco de los subsistemas de Satmex 6 y es aquí donde realizamos la comparación técnica entre ambos satélites de acuerdo a sus características específicas, dicha comparación se incluye en un cuadro resumen, la comparación económica también se menciona, aunque la descripción de los costos aparece en el capítulo 6.

En el capítulo 5 incluimos la teoría básica para hacer cálculos de enlace y mostramos algunos ejemplos. Este capítulo es muy importante ya que muestra de forma analítica, algunas de las ventajas de Satmex 6 sobre Satmex 5 como la reducción de las antenas de las estaciones terrenas y la mejora en la relación portadora ruido en el enlace.

El capítulo 6 contiene información a considerar para la construcción de un satélite y el costo que implica realizarlo. Para Satmex 5 logramos aplicar un método denominado TFU que permite calcular los costos de elaboración de un satélite por medio del peso de cada uno de sus subsistemas, los resultados obtenidos son muy aproximados al dato real del costo de Satmex 5. Para Satmex 6 no nos fue posible realizarlo debido a que la información de este tipo, todavía no se encuentra disponible para el público en general por cuestiones de seguridad, ya que aun no se ha lanzado.

El capítulo 7 nos da un panorama muy general de algunos servicios satelitales que actualmente ofrecen los satélites, principalmente geoestacionarios, en países que han desarrollado mejor este campo, de tal forma que se tenga una idea de los posibles aplicaciones que se pueden incluir en la siguiente generación de satélites mexicanos así como la aplicación de nueva tecnología como los sistemas microelectromecánicos que ofrecerán grandes ventajas a menor costo y que serán utilizados en un futuro muy cercano para la construcción de satélites.

En el capítulo 8, incluimos nuestras conclusiones después de haber analizado nuestro trabajo, donde hacemos énfasis en la importancia de la tecnología satelital y sobre todo de la tecnología satelital mexicana.

Finalmente se incluyen la bibliografía y referencias respectivas, que nos sirvieron de apoyo para la realización de este trabajo.

## CAPÍTULO 1

### 1.1 Antecedentes

Todo comenzó en 1945 cuando Artur Clarke sugirió la posibilidad de colocar satélites artificiales en una órbita tal que al observarlos desde un punto sobre la superficie de la Tierra parecieran inmóviles; esta órbita fue nombrada geoestacionaria, también conocida como el cinturón de Clarke. Él mencionó que para que esto se cumpliera y fuera geoestacionario el satélite debía desplazarse en el mismo sentido de la rotación de la Tierra, que no perdiera altura y que completase una vuelta en 24 horas; para ello, debía estar aproximadamente a 36000 Km. de altura sobre el nivel del mar y tener una velocidad constante de 3705 m/s siguiendo una órbita circular. En dicha órbita se encuentran satélites de apariencia física y aplicaciones muy diversas: meteorológicos, militares, experimentales y de comunicaciones. En la actualidad el cinturón de Clarke está ocupado con alrededor de 260 satélites activos y su número se va incrementando continuamente con nuevos lanzamientos.

Además del uso de la órbita geoestacionaria, en los 90's comenzaron a desarrollarse proyectos para colocar satélites menos pesados y costosos a altitudes mucho más cercanas a la superficie de la Tierra, en trayectorias generalmente circulares llamadas bajas e intermedias. Los satélites colocados en estas órbitas no operan individualmente como los geoestacionarios, sino en equipo, pues se necesitan muchos a la vez girando alrededor de la Tierra para formar una constelación. Los servicios para los que las primeras constelaciones han sido diseñadas están fundamentalmente orientados a terminales personales portátiles de telefonía, radiolocalización y transmisión de datos a tasas bajas.

Las orbitas polares son trayectorias circulares sobre planos cuya inclinación es cercana a los 90° con relación al plano ecuatorial; por esta razón, estos satélites pasan una y otra vez sobre los polos de la Tierra conforme ésta gira sobre su propio eje, y la cobertura de cada uno es total en unos cuantos días ya que sobrevuela la superficie terrestre a lo largo de gajos imaginarios.

En el caso de los geoestacionarios, el trayecto atenúa la señal de manera drástica por lo que se utilizan unidades de transmisión muy potentes, antenas de alta ganancia y dispositivos de recepción muy sensibles. Un satélite es geosíncrono cuando su órbita es circular y tiene un periodo orbital igual a la duración de un día sideral. En el caso particular de que el plano orbital coincida con el plano ecuatorial y si el satélite se mueve en la misma dirección que la rotación terrestre, entonces el satélite es geoestacionario. Un satélite geoestacionario es implícitamente geosíncrono, pero un satélite geosíncrono no necesariamente es geoestacionario.

El perímetro de la órbita geoestacionaria es del orden de 265000 Km. En dicha órbita se pueden colocar muchos satélites geoestacionarios. Como el plano de la órbita geoestacionaria por definición coincide con el plano ecuatorial, todo satélite que esté ahí tiene en teoría una latitud geográfica de cero grados, entonces, para ubicarlo con relación al

planeta basta con conocer su longitud geográfica, ya sea este u oeste, tomando como referencia al meridiano de Greenwich cuya longitud es de  $0^\circ$ . Satmex 5 está colocado en  $116.8^\circ\text{O}$ . y Satmex 6 estará colocado en la posición  $113.0^\circ\text{O}$ .

La separación en grados entre satélites vecinos está regida por los niveles permisibles de interferencia radioeléctrica; estas interferencias ocurren porque los platos parabólicos comúnmente usados en los satélites tienen lóbulos laterales. La separación mínima promedio que debe haber entre dos satélites vecinos para evitar interferencias es aproximadamente de  $2^\circ$  de arco, esto significa que entre ellos hay aproximadamente 1500 Km. de distancia. A fines de los 80's Estados Unidos, México y Canadá firmaron un convenio aceptando la reducción del espacio a  $1.9^\circ$  en el arco orbital entre los satélites mexicanos y canadienses.

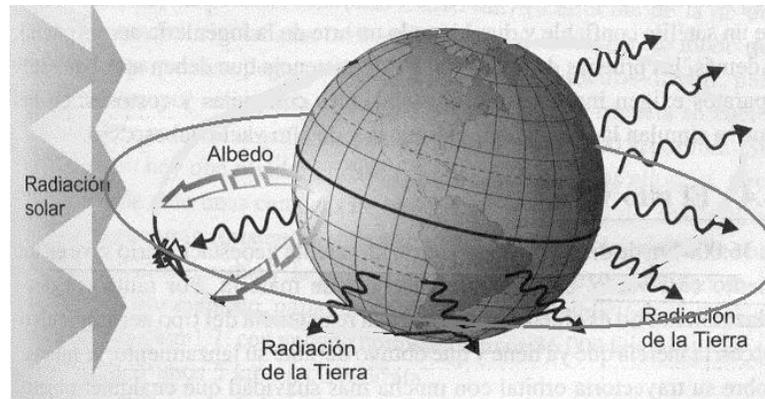
Los lanzamientos se llevan a cabo en poderosos cohetes que llevan satélites de varias toneladas a bordo, destinados a permanecer en órbita geoestacionaria, geosíncrona, elíptica o circular inclinada, ya sea esta última baja o intermedia. Desde Kourou, Guyana Francesa, despegan los cohetes Ariane que han llevado al espacio a los satélites Solidaridad 1 y 2 y al Satmex 5. El Satmex 6 será lanzado también en un cohete Ariane-5 desde el mismo lugar.



En la figura 1.1 se muestra el cohete Ariane 5 que lanzará al Satmex 6 al espacio.

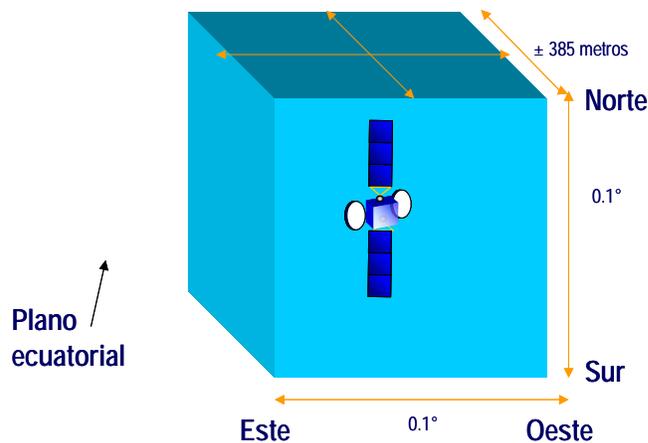
En el espacio hay un alto vacío, temperaturas extremas, intensas radiaciones y partículas superveloces que pueden dañar e incluso destruir un satélite. Además hay poderosas fuerzas invisibles de los cuerpos celestes cercanos que jalonean al satélite y alteran su órbita, su posición sobre ella y su orientación con relación a la Tierra. Necesita ayuda para resolver estos contratiempos y tener cierta flexibilidad de movimiento, ya que no se dejará de mover con relación a su posición nominal debido a las fuerzas externas; de estas últimas la que más le afecta es la simetría o triaxialidad del campo gravitatorio de la Tierra, este campo no es esféricamente uniforme, pues la distribución de la masa del planeta no es homogénea,

además el satélite tampoco tiene una masa homogénea ya que con el simple hecho de que haya movimiento en sus antenas, sus paneles solares o el combustible que quede dentro de sus tanques, produce pares o fuerzas que lo afectan. Conforme los tanques de combustible se van vaciando, el centro de masa del satélite cambia. La fuerza perturbadora de la Luna también afecta pero en menor grado, y aún en menor la del Sol. Otra fuerza que también se produce es la presión de la radiación solar sobre la superficie de su estructura, así como la presión del flujo rerradiado o reflejado por la superficie terrestre denominado albedo.



En la figura 1.2 se muestra el tipo de radiaciones que el satélite recibe.

Por tales razones, los satélites tienen un subsistema de propulsión que les ayuda a corregir su orientación y posición. Generalmente el satélite puede moverse dentro de una caja imaginaria en el espacio de algunos kilómetros de cada lado, aproximadamente 75 x 75 x 85 Km. A esta caja imaginaria dentro de la cual se mueve el satélite se le conoce como Ventana de Posicionamiento.



En la figura 1.3 observa la ventana de posicionamiento.

Al tiempo que puede trabajar un satélite sin problemas se le conoce como vida útil, y esta última depende en gran parte de la eficiencia con la que los operadores en la Tierra

administren el combustible contenido en los tanques de almacenamiento del satélite. Las últimas gotas de combustible de un satélite se emplean para impulsar al satélite hacia otra órbita de radio ligeramente mayor que la órbita geoestacionaria.

Un satélite está integrado por un gran número de elementos, fabricados con distintos materiales y diseñados para realizar funciones diversas; cada parte del satélite tiene ciertos rangos de temperatura, por ejemplo, típicamente en las superficies expuestas al sol y sombra, la temperatura varía dentro de un intervalo aproximado que va de  $-100^{\circ}\text{C}$  a  $+120^{\circ}\text{C}$ . La temperatura neta del aparato está determinada por la combinación de las radiaciones que llegan del Sol y la Tierra, sus fuentes internas de calor, y el calor eliminado por radiación a través de su estructura.

Durante ciertos periodos de toda su vida útil de operación, un satélite geoestacionario se ve expuesto a eclipses, y en tales casos necesita obtener su energía eléctrica de alguna otra fuente que no sea el Sol para continuar funcionando; esta fuente secundaria o de respaldo la constituye un conjunto de baterías, que se cargan cuando las células solares se hayan expuestas al Sol y se descargan durante los eclipses o en las horas pico de mayor demanda de energía.

Es importante mencionar que los satélites artificiales inician su historia en 1957 con el lanzamiento del Sputnik 1 en Rusia. Durante algún tiempo se discutió la conveniencia de colocar varios satélites en órbita geoestacionaria (lo que implica costos de lanzamiento más elevados) o bien una multitud de satélites en órbitas más bajas (con el consiguiente aumento en el costo de los satélites). La polémica concluyó en favor de la solución geoestacionaria, ya que dichos satélites serían de seguimiento mucho más fácil. El primer satélite de comunicaciones verdadero, el Telstar 1, fue lanzado a una órbita terrestre baja. Fue también el primer satélite comercial a cargo de la American Telephone and Telegraph. El Telstar 1 se lanzó el 10 de julio de 1962.

La génesis del sistema de satélites mexicanos data de finales de los años sesenta. En 1968 México se convirtió en usuario del sistema INTELSAT y se construyó la primera estación terrena en el estado de Hidalgo. Ingresó a las comunicaciones espaciales transmitiendo por primera vez en la historia los Juegos Olímpicos por televisión a color. Para 1970 se comenzó a utilizar capacidad en un satélite de Intelsat para servicios domésticos de comunicaciones nacionales e internacionales, y el norteamericano Westar III, para cubrir las emisiones de la televisión mexicana a ciudades del vecino país del norte.

Los primeros años de la década de los ochenta fueron de búsqueda de capacidad en algunos satélites extranjeros, de modo que a mediados de 1981 se comenzó a rentar espacio en tres satélites extranjeros. Para 1982 la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) contrató a Hughes para construir el sistema satelital mexicano "Morelos" constituido por dos satélites geoestacionarios HS 376, estabilizados por cuerpo.



En la figura 1.4 se ejemplifica a un satélite estabilizado por cuerpo o por giro

El 17 de junio de 1985 fue lanzado, en la Administración de Miguel de la Madrid Hurtado, el Morelos I desde el Centro Espacial de Cabo Cañaveral, Florida, por medio del transbordador espacial Discovery a bordo de la misión tripulada 51-G de la NASA. El satélite alcanzó exitosamente su posición orbital  $113^{\circ}\text{O}$ , con cobertura nacional; y el 29 de Agosto de ese mismo año inició finalmente sus operaciones al enlazar Morelia Michoacán, y la Torre Central de Telecomunicaciones de México, D.F. Ese mismo año se realizó la construcción del Centro de Control Iztapalapa ubicado en la Ciudad de México. Cinco meses después, en noviembre, despegó el transbordador Atlantis (OV-104), con el Morelos II y el Dr. Rodolfo Neri Vela, el primer astronauta mexicano, como uno de los siete tripulantes, desde Cabo Cañaveral en la misión tripulada de la NASA 61-B. El satélite ocupa la posición orbital  $116.8^{\circ}\text{O}$ , con cobertura nacional.



En la figura 1.5 se muestra una foto del Centro de Control de Iztapalapa

Para 1989 se tomó la decisión para el emplazamiento especial de un nuevo satélite nacional, que por Acuerdo del Ejecutivo Nacional sería denominado "Solidaridad". La saturación del Sistema Morelos, apresuró la autorización para la realización inmediata de las gestiones a fin de iniciar el proceso de licitación del Sistema de Satélites Solidaridad,

dos satélites más que serían lanzados en el período de Carlos Salinas de Gortari, con lo que se iniciaba la sustitución del Morelos I y II. Meses más tarde se creó Telecomm (Telecomunicaciones de México), un organismo descentralizado que se convirtió en el operador del Sistema Satelital Morelos.

En Mayo de 1991 Telecomm contrata a la empresa Hughes para la construcción del Sistema Satelital Solidaridad. Los dos satélites geoestacionarios HS 601 de estabilización triaxial se diseñaron para ofrecer servicios de banda C en México, el sur de Estados Unidos y el resto de Latinoamérica, y servicios de banda Ku en México y Estados Unidos.



En la figura 1.6 se muestra un satélite de estabilización Triaxial,

El 17 de noviembre de 1993 se llevó a cabo el Lanzamiento de Solidaridad 1 a bordo de un vehículo Ariane 4 desde Kourou, Guyana Francesa. El satélite alcanzó exitosamente su posición orbital  $109.2^{\circ}\text{O}$ . El 17 de octubre de 1994 se lanzó el satélite Solidaridad 2 a bordo de un Ariane 4 desde Kourou, Guyana Francesa; alcanzó exitosamente su posición orbital  $113^{\circ}\text{O}$ .

Para 1995 se inició el proceso hacia la privatización de la Sección de Servicios Fijos Satelitales de Telecomm (hoy Satmex) y entró en vigor la Reforma a la Ley de Telecomunicaciones.

En 1997 se pidió a Hughes la construcción del Morelos 2R (hoy Satmex 5) con cobertura en banda C y Ku en todo el Continente Americano. El 26 de junio: la Sección de Servicios

Fijos Satelitales de Telecomm se registró bajo la legislación mexicana, y se constituyó la empresa Satélites Mexicanos, S.A. de C.V. (Satmex). La empresa continuó siendo propiedad del Estado y para Octubre, después de realizarse una licitación pública, la alianza entre Principia y Loral Space & Communications adquirió 75% de Satmex. El gobierno retuvo una participación de 25% sin derecho a voto. Satmex atrajo una inversión de \$645 millones de dólares a México. Para mayo de 1998 se incorporó el nuevo equipo directivo de la empresa. Se integraron las bases y herramientas de la nueva administración y dirección ejecutiva y el 5 de diciembre del mismo año Satmex 5 es lanzado al espacio a bordo de un vehículo Ariane 4L desde Kourou, Guyana Francesa. En 1999 la consolidación del proceso de transformación trae como resultado la venta en su totalidad del Satmex 5.

Ya en el 2000 Satmex anunció sus resultados financieros, excediendo la expectativa de los mercados internacionales con un 24% de aumento en los ingresos con respecto del año anterior. Se intensificó la participación de la compañía en foros de industria y financieros a nivel internacional; desgraciadamente ese mismo año se perdió el satélite Solidaridad 1 debido a un corto circuito generado por el crecimiento de filamentos de estaño en los relevadores del procesador redundante SCP2. Después de ello, Satmex contrató a Space Systems/Loral de Palo Alto, California, para la construcción de un satélite geoestacionario de alta potencia: Satmex 6.

En 2001 se inauguró la Sala de Tecnología Satelital, patrocinada por Satmex en el Museo de las Ciencias Universum de la UNAM, incluye, entre otras cosas, las últimas tecnologías en educación a distancia; este mismo año comenzó la construcción del satélite Satmex 6, que será lanzado a mediados del 2004 en la posición orbital de 113.0°O.

A la fecha Satmex hace frente a la continua apertura y desregularización de las telecomunicaciones internacionales, y hace frente a la competencia continental con una proyección comercial de vanguardia. Satmex 5 es el primer satélite puesto en órbita bajo contrato de una empresa privada, y es el único satélite Latinoamericano con cobertura en todo el continente en una sola huella satelital. Con Satmex 5 y el resto de su flota satelital, la empresa proporciona servicios a nivel regional y continental.

Actualmente Satmex provee servicios fijos vía satélite con cobertura en América desde Canadá hasta la Patagonia. Tiene cobertura continental y derechos de aterrizaje en 40 países. Actualmente Satmex cuenta con los satélites Solidaridad 2, Satmex 5 y Satmex 6 (este último por lanzarse) con cobertura Continental en bandas C y Ku, y ofreciendo altos niveles de potencia de la flota, gran flexibilidad por región, alta confiabilidad del servicio y amplia experiencia trabajando con la plataforma HNS. Estas características son excelentes para aplicaciones como video broadcasting, acceso a Internet de alta velocidad y telefonía rural entre otras.

El interés por la industria satelital en nuestro país fue el principal motivo que nos impulsó a la realización del proyecto, creemos que es importante conocer la realidad de los dos satélites más modernos de México, resaltar las diferencias técnicas y de diseño, así como los costos implicados en su construcción y lanzamiento con la finalidad de proponer un satélite con características mejoradas basadas en los resultados de la comparación de los dos satélites antes mencionados y de una investigación sobre la evolución de los mismos;

así mismo basada en las tendencias en materia de comunicaciones de los satélites de otros países más desarrollados económicamente, ya que sabemos que el crecimiento en estas tecnologías es ilimitado y, hoy en día, los países desarrollados cuentan con tecnologías muy avanzadas en este campo.

Actualmente Satmex pasa por una etapa decisiva en la historia mexicana. Sabemos que cubrir las necesidades de nuestra población es una prioridad y que se debe mostrar competitividad mundial en este campo; es de suma importancia que México cuente con sus propios satélites, ya que este es un sello distintivo de los avances tecnológicos que el país está llevando a cabo. Es cierto que la globalización mundial destruye fronteras, sin embargo, se debe tener un especial cuidado en la autodeterminación y soberanía de la infraestructura que solo confiere a los mexicanos.

Esta tesis muestra la importancia de los satélites mexicanos y el desarrollo de ellos, sin embargo esperamos despertar en los lectores una conciencia nacionalista enfocada al desarrollo y al crecimiento de los satélites mexicanos; al apoyo de todas las partes que intervienen en este proyecto de una empresa mexicana muy importante para la independencia y soberanía nacional.

## CAPITULO 2

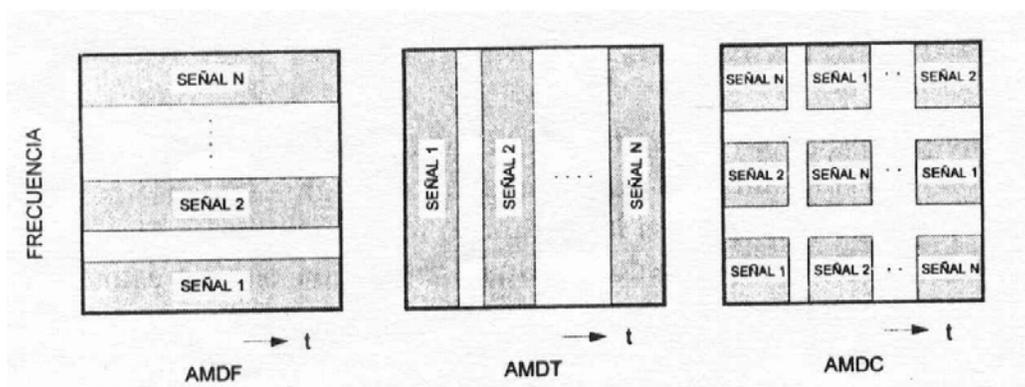
## 2.1 Técnicas de acceso múltiple

Las técnicas de acceso múltiple hacen posible que distintas estaciones terrenas transmisoras utilicen un mismo transpondedor de satélite. En este capítulo se explicarán las técnicas que emplean los satélites Satmex 5 y Satmex 6.

La diferencia entre el concepto de acceso múltiple y multiplexaje consiste en que el acceso múltiple se realiza siempre en radiofrecuencia en tanto que el multiplexaje se realiza en banda base. También el multiplexaje se produce, ya sea en una estación terrena o en una red terrena enlazada a una estación terrena, en tanto que el acceso múltiple ocurre en los satélites, originado en los enlaces desde distintas estaciones terrenas.

El acceso múltiple puede clasificarse de acuerdo con la forma en que las estaciones terrenas utilizan la capacidad de frecuencia de un transpondedor:

- Acceso múltiple por distribución de frecuencia (AMDF o FDMA) por el cual cada estación terrena utiliza una parte distinta de la gama de frecuencias del transpondedor.
- Acceso múltiple por distribución en el tiempo (AMDT o TDMA) por el cual cada estación terrena utiliza la misma parte de la capacidad en frecuencia del transpondedor que las otras, pero en un intervalo de tiempo distinto, sincronizado y de duración usualmente fija que se repite en cada trama, durante el cual se transmite un grupo de dígitos comúnmente llamado ráfaga.
- Acceso múltiple por diferencia de código (AMDC o CDMA), en el cual las estaciones utilizan la misma parte de la capacidad en frecuencia del transpondedor ya sea al mismo tiempo o en distinto momento.



En la imagen 2.1 se muestra en términos generales las distintas formas de acceso múltiple, mostrando el tiempo y la frecuencia en los ejes.

Algunos autores identifican otra categoría denominada acceso múltiple por división en el espacio, que representa lo que hemos llamado reuso de frecuencias por cambio de polarización, por medio del cual transpondedores conectados a distintas antenas pueden tener la misma gama de frecuencias.

Se hace una clasificación adicional del acceso múltiple, superpuesta y por tanto coexistente con la anterior, por la forma en que a las estaciones se les asigna en el tiempo la capacidad de un transpondedor:

- ❑ Acceso múltiple con asignación previa o permanente, abreviado AMAP (PAMA en inglés), por el cual cada canal de cada estación tiene asignada permanentemente una parte de la capacidad en frecuencia del transpondedor en la forma de acceso AMDF o una posición determinada de ráfaga en la forma de acceso AMDT .
- ❑ Acceso múltiple con asignación por demanda, abreviado AMAD (DAMA en inglés), en que las estaciones no tienen asignada en forma permanente una frecuencia del AMDF o una ráfaga de una portadora de frecuencia fija del AMDT, sino que en el momento en que requieren establecer una comunicación se les asigna una que no esté ocupada, la cual es reasignada a otras estaciones cuando concluye dicha comunicación.
- ❑ Acceso múltiple aleatorio, abreviado AMA (RMA o RA en inglés ), por el cual en el momento en que una estación requiere comunicarse utiliza un intervalo de tiempo de transmisión cualquiera en una portadora.

Las categorías de acceso múltiple se asocian usualmente con determinados tipos de multiplexaje y modulación, encontrándose entre las combinaciones más comunes las siguientes:

Señales	Multiplexaje	Modulación	Acceso múltiple
Analógicas	MDF	MF	AMDF/AMAP
	-	MF	AMDF/AMAP o AMAD
Digitales	-	MDPH	AMDF/AMAP o AMAD
	MDT	MDPH	AMDF/AMAP
	MDT	MDPH	AMDT/AMAP o AMAD

- MDF - Multiplexaje por división de frecuencia
- MDT - Multiplexaje por división en el tiempo
- MF - Modulación de frecuencia
- MDPH - Modulación por desplazamiento de fase
- AMDF - Acceso múltiple por distribución de frecuencia
- AMDT - Acceso múltiple por distribución en el tiempo
- AMAP - Acceso múltiple con asignación previa
- AMAD - Acceso múltiple con asignación por demanda

Los dos ejemplos del cuadro anterior en que no se señala categoría de multiplexaje corresponden a portadoras que contienen una sola señal operando en la forma conocida como SCPC (Single Channel per Carrier), en contraste con las que contienen múltiples

señales que se conocen como MCPC (Multiple Channel per Carrier) correspondientes a los otros tres ejemplos.

### **2.1.1 Acceso múltiple por distribución de frecuencia (AMDF o FDMA)**

Esta fue la primera técnica de acceso y es la más utilizada actualmente tanto para señales analógicas como digitales MCPC o SCPC. Para aplicarla solo se requiere que cada estación terrena transmita en una o más frecuencias diferentes a las de la demás. Es tan predominante esta técnica de acceso que ocurre siempre que un transpondedor opere con más de una portadora en distinta frecuencia, pudiendo coincidir con otra técnica de acceso de la primera clasificación respecto de toda su capacidad.

Una de las ventajas de esta técnica es su simplicidad y menor costo inicial de inversión especialmente para redes de punto a punto de tamaño pequeño o mediano empleando circuitos con asignación previa, es decir, de frecuencia fija a tiempo completo. También es muy útil para redes telefónicas SCPC de muchas estaciones con rutas de muy bajo tráfico y asignación por demanda, proporcionando una alta eficiencia de la capacidad satelital empleada.

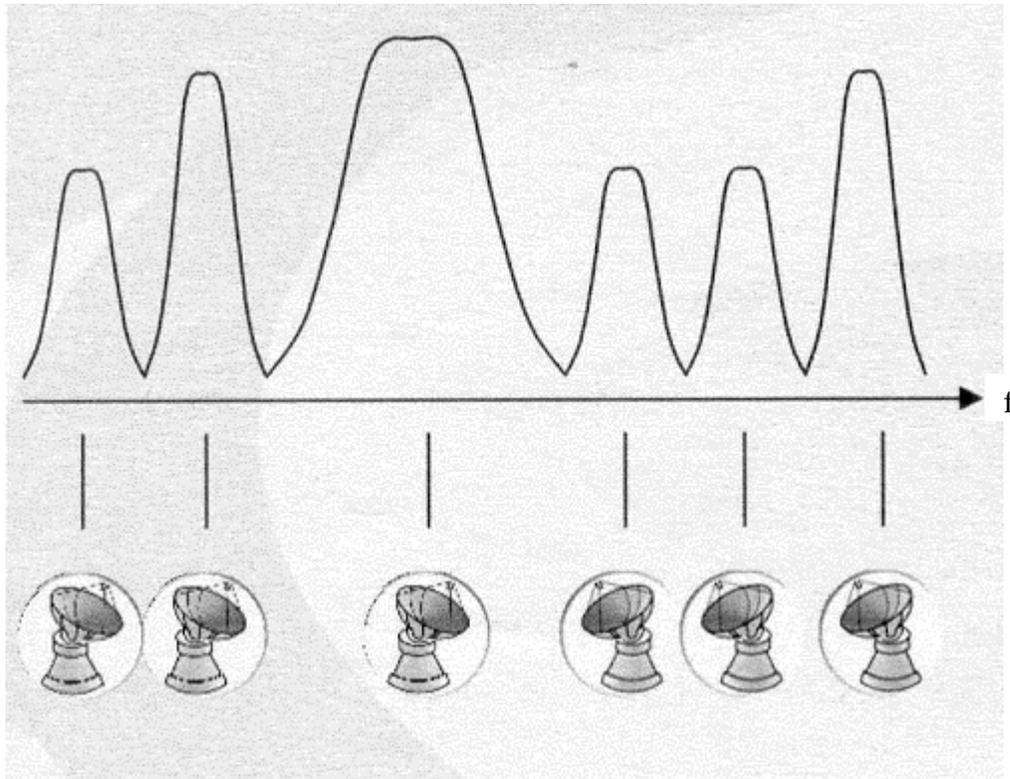
Esta forma de acceso es también típica de las redes SCPC de datos y de voz comprimida en que operan la mayoría de las estaciones con reflector de diámetro pequeño conocidas como VSAT que han tenido gran demanda para servicios privados, ya que en general requieren bajas velocidades binarias por canal en cada estación y la mayoría de las estaciones operan uno o dos circuitos solamente.

Debido a que esta técnica se aplica cuando existen múltiples portadoras independientes tiene el inconveniente inherente de la intermodulación entre ellas por alinealidades del transpondedor. Por este motivo, empleando múltiples portadoras es necesario reducir la potencia total a la entrada del transpondedor; para evitar el excesivo ruido de intermodulación.

La versión digitalizada de las portadoras MCPC para enlaces troncales de telefonía se basa en señales MIC o MICDA multiplexadas en el tiempo.

La anchura de banda ocupada por la portadora depende de la velocidad binaria de la señal multiplexada y del tiempo de modulación en radiofrecuencia empleado.

Se emplea una portadora llamada piloto al centro del transpondedor, transmitida por una estación y recibida por todas las demás para usarla como referencia de frecuencia, a fin de mantener un espaciamiento fijo entre portadoras puesto que siendo éstas angostas, pequeñas variaciones porcentuales de su frecuencia central, pueden hacer que se aproximen demasiado unas a las otras.

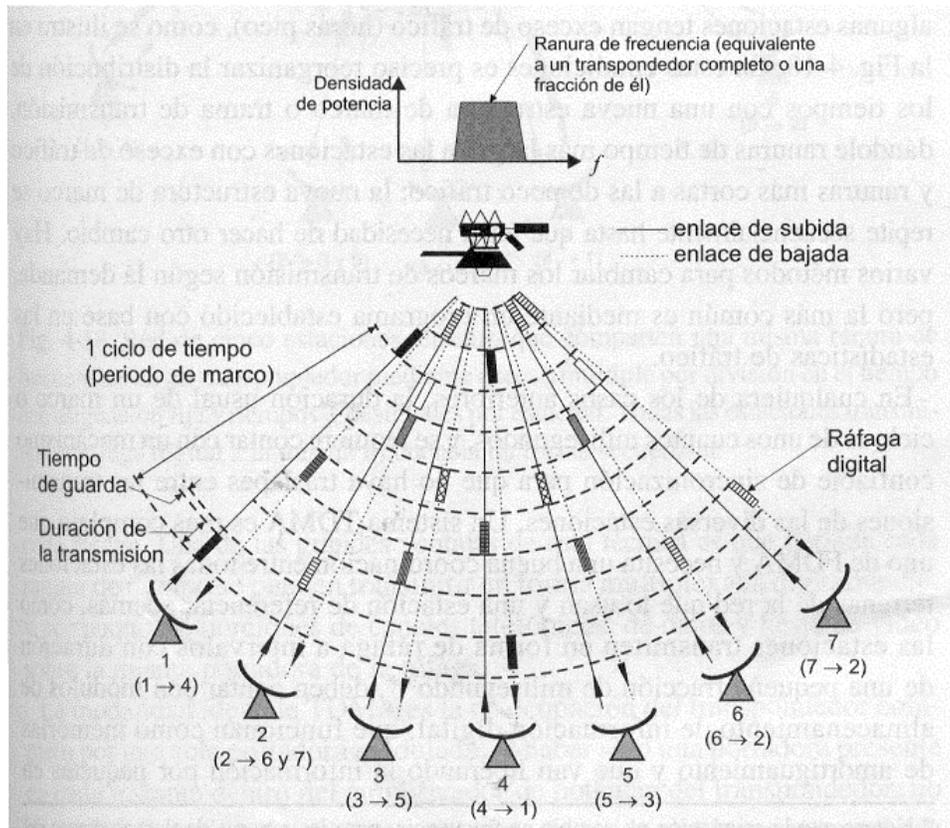


En la figura 2.2 se observa que cada antena ocupa un espacio del espectro de frecuencia.

### 2.1.2 Acceso múltiple por distribución en el tiempo (AMDT o TDMA)

La técnica de acceso múltiple por distribución en el tiempo consiste en la compartición de la capacidad de una sola portadora por todas las estaciones de una red mediante turnos de utilización, en forma tal que aún así el tráfico de entrada y de salida de cada una pueda ser continuo. Tiene la capacidad inherente de permitir que cada estación se comuniquen con cualquier otra, es decir, que la red opere con una configuración en malla y flexibilidad para modificar la cantidad y distribución del tráfico entre sus estaciones.

Esta técnica de acceso solo es aplicable a portadoras digitales y es ideal para evitar las limitaciones de la técnica AMDF originadas por los efectos de intermodulación, lo que se logra con una sola portadora por transpondedor (SCPT). En esa circunstancia, el transpondedor puede operar a su potencia total de saturación con un aumento importante en el PIRE descendente. Se obtiene así una doble ventaja en la relación C/N por aumentar el PIRE de la portadora y por eliminarse el ruido de intermodulación, lo que hace posible aumentar la capacidad de canales mediante los recursos de intercambio entre potencia y anchura de banda que hemos mencionado repetidamente. Es una técnica de acceso adecuada para redes internacionales y para algunas redes públicas nacionales de gran capacidad de telefonía y de datos, ya que para televisión, aunque se ocupen transpondedores completos obteniendo ventajas similares solo existe una estación transmisora por red, por lo que no puede hablarse de acceso múltiple.



En la figura 2.3 se muestra un diagrama de cómo irían viajando los paquetes de información que son transmitidos.

Desafortunadamente, en un sistema de cobertura nacional o regional, de las redes que no son de televisión, solo pocas requieren la capacidad total de un transpondedor que es la forma de obtener la ventaja mencionada.

Cada estación de una red AMDT transmite en la misma frecuencia, pero en ráfagas separadas por breves guardas de tiempo para evitar que factores como las variaciones de las condiciones de propagación, hagan que se superpongan. Para que cada ráfaga se transmita en el momento preciso debe ajustarse la temporización a la distancia de cada estación al satélite.

Una trama que comúnmente tiene una duración que no excede de pocos milisegundos, está constituida por la ráfaga de referencia, la ráfaga de referencia de la estación de referencia redundante, las ráfagas de comunicación de cada una de las estaciones de tráfico y las guardas de tiempo. Al terminar de transmitirse una ráfaga de cada una de las estaciones de la red se inicia una nueva trama.

La portadora única es recibida por todas las estaciones, utilizando cada una de ellas las partes que le corresponden como destino gracias a la información adicional de cada ráfaga.

Una de las ventajas de esta técnica de acceso múltiple es su inherente facilidad para modificar las configuraciones y otros parámetros de la red sin cambios o con mínimos cambios en los equipos. Una misma red puede estar dedicada a un solo tipo de servicio o

puede manejar, por ejemplo, tráfico de voz, de datos y de videoconferencia al mismo tiempo utilizando módulos de tráfico específicos para cada aplicación, cada uno con modo de acceso en el tiempo según alguna de las categorías de acceso de la clasificación superpuesta.

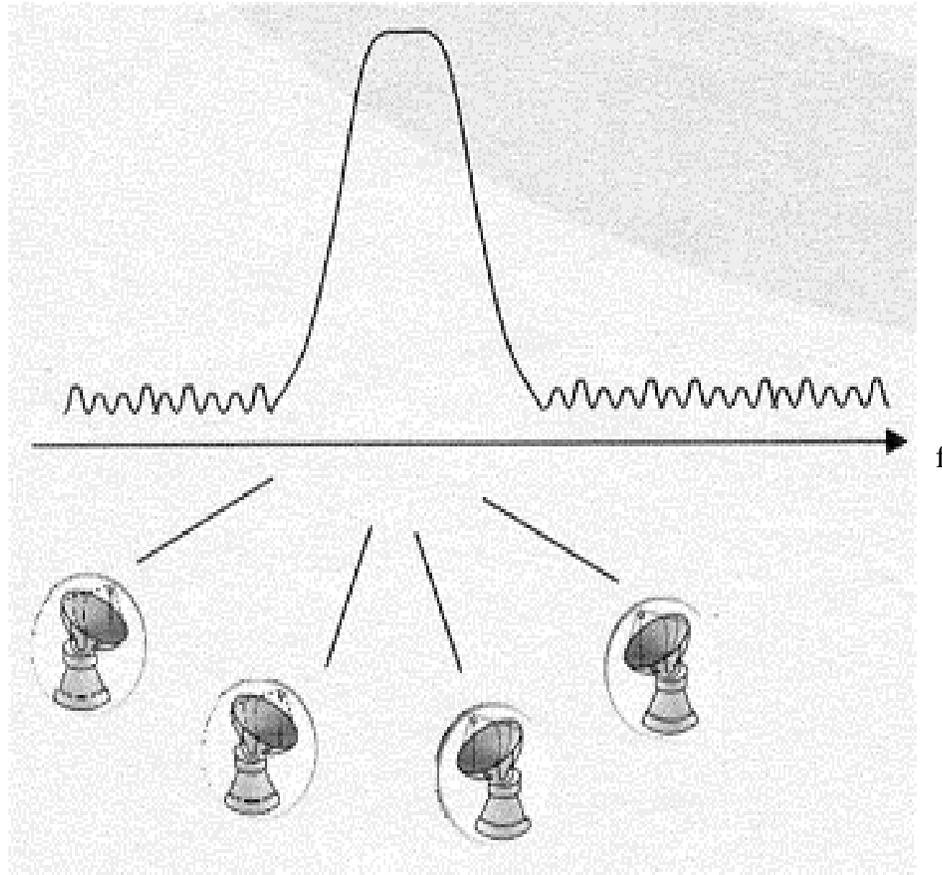
La guarda de tiempo entre ráfagas se determina tomando en cuenta las variaciones en las mediciones de propagación, en el tiempo de adquisición de la sincronización, y en los demás retrasos causados en los equipos.

Las redes AMDT que utilizan un transpondedor completo operan típicamente a velocidades binarias de 45, 60 y 120 Mbits/s.

Una ventaja de la operación con AMDT y una sola portadora por transpondedor, adicional a las ya comentadas, es que pueden reducirse las variaciones del PIRE descendente al variar el PIRE ascendente, lo que es especialmente útil en las bandas más sensibles a los efectos de la lluvia.

En este tipo de redes actualmente se puede lograr el crecimiento progresivo de capacidad que era una de las ventajas de redes SCPC/AMDF, gracias a que en lugar de emplear una sola portadora con la capacidad total prevista se diseñan para un número de portadoras de menor capacidad que puede aumentar de acuerdo con sus necesidades reales de desarrollo.

En el caso de una red en estrella en la cual existe una estación principal o maestra y estaciones secundarias o remotas todas las cuales se comunican solo con la principal, puede ser conveniente utilizar una portadora independiente con técnica MDT para la transmisión de la maestra y una o más portadoras AMDT de las secundarias a la maestra.



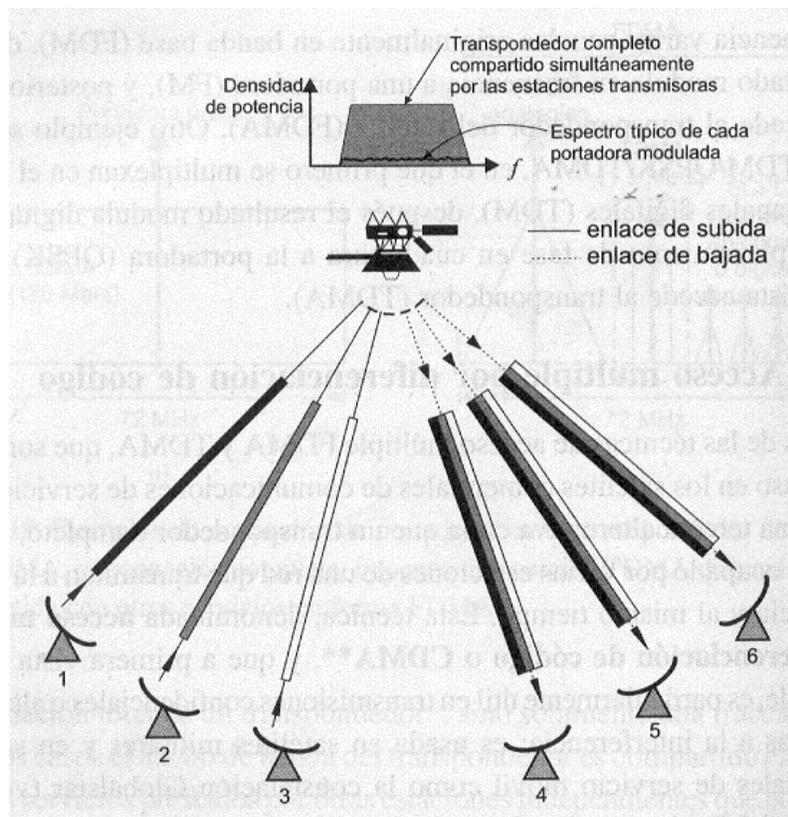
En la imagen 2.4 se observa que todas las estaciones terrenas usarán el mismo espectro de frecuencia pero a diferentes tiempos.

### 2.1.3 Acceso múltiple por diferenciación de código (AMDC, CDMA O AMEE)

En la técnica de AMDC para señales digitales, también llamada acceso múltiple por ensanchamiento de espectro (AMEE), cada carácter binario de información antes de ser transmitido se transforma por medio de un código individual en una señal que puede ocupar hasta la totalidad de la anchura de banda destinada a la red. Es decir, la transmisión de cada estación terrena puede estar totalmente superpuesta en frecuencia a la de las demás estaciones. Es una técnica útil para contrarrestar efectos de deterioro de las señales causados por interferencia o desvanecimiento que sean selectivos en frecuencia.

Cada estación receptora identifica la señal que le corresponde utilizando para ello métodos de correlación, que permiten una alta probabilidad de recepción correcta aún en presencia de la alta interferencia causada por las demás señales, debido a que cuenta con el código individual para descifrarla y a la gran longitud de los trenes de bits que representan a cada carácter. Como consecuencia de la individualidad y extensión de la codificación los sistemas AMDC proporcionan un cierto grado de protección de las comunicaciones contra su uso no autorizado.

Esta técnica no es muy comercial.



En la figura 2.5 se muestra el concepto de AMCD

## CAPITULO 3

### 3.1 Subsistemas de Satmex 5

Satmex 5 es un satélite geoestacionario que proporciona servicios de comunicaciones comerciales como Internet, telefonía internacional, televisión analógica y digital, transmisión de datos y distribución de contenido multimedia. Fue puesto en órbita el 5 de diciembre de 1998 por un cohete de Ariane Space y está ubicado en 116.8° O; aunque inició su operación en enero de 1999. Tiene programada una vida útil de 15 años, por lo que se espera que continúe funcionando hasta el 2013.

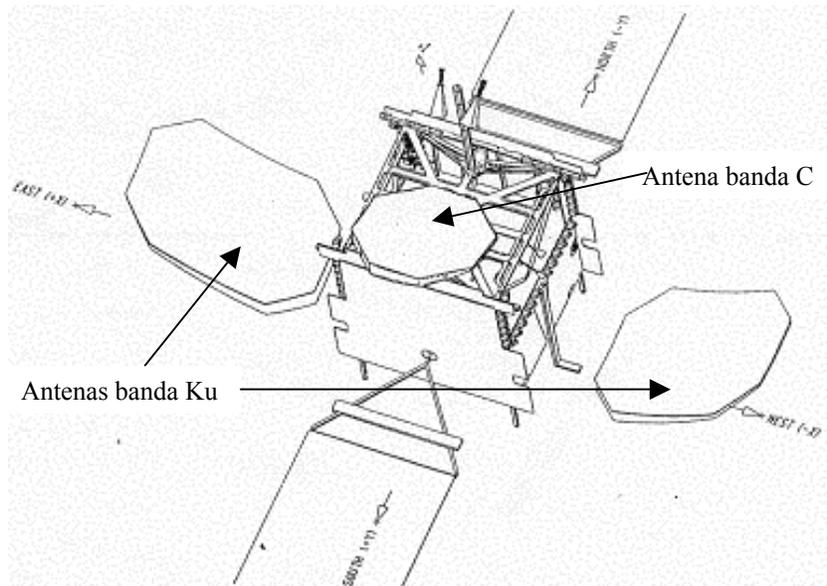
Pertenece a la familia B-601HP de alta potencia y de estabilización triaxial y su modelo es el HS 601 HP. Este satélite fue fabricado por Hughes Space & Communications en California EUA. Opera 48 transpondedores: 24 en Banda C (36 MHz) y 24 en Banda Ku (36 MHz) de alta potencia.

Al igual que todos los satélites es un sistema integrado por varios subsistemas; cada uno de ellos es igualmente importante, pues su probable falla podría causar la inutilidad parcial o total del conjunto.

#### 3.1.1 Subsistema de Antenas

Este subsistema también se puede considerar dentro del subsistema de comunicaciones. Su función es recibir y transmitir las señales de radiofrecuencia desde o hacia las direcciones y zonas de cobertura deseadas.

En general las antenas reciben las señales de radiofrecuencia provenientes de las estaciones terrenas transmisoras, y después de que son amplificadas y/o procesadas por el satélite, las transmiten de regreso hacia la Tierra, concentradas en un determinado haz de potencia. “Son el puerto de entrada y de salida”, es decir, son la interfase o etapa de transformación entre las señales electromagnéticas que viajan por el espacio y las señales que circulan dentro de sus subsistemas de comunicaciones, rastreo, telemetría y comando.



En la figura 3.1 se muestra la ubicación de las antenas en un satélite similar al Satmex 5, ya que en este último el reflector de banda C (ubicado en el centro de la imagen) es circular.

La tierra se encontraría saliendo del papel hacia el lector.

Los elementos de alimentación (alimentadores) se usan en antenas reflectoras, y generalmente son cornetas conectadas a guías de onda que emiten energía hacia un reflector parabólico, o bien la captan proveniente de éste último para entregársela a los equipos receptores. Las hay de distintos tamaños, configuraciones y acabados, según las frecuencias a las que tengan que trabajar y la cobertura que deban tener. En el caso de Satmex 5, para la banda Ku se usan 2 alimentadores (para cada antena) de corneta corrugada (uno para la polarización horizontal y otro para la vertical), y para la banda C se tienen 2 alimentadores de corneta piramidal (uno para la polarización horizontal y otro para la vertical).

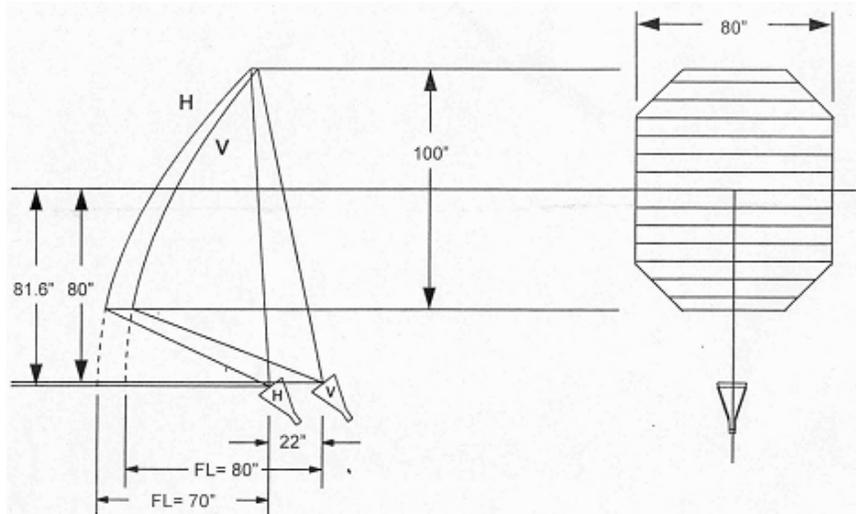


En la figura 3.2 se muestra, a la izquierda el tipo de alimentador para la banda C y a la derecha el alimentador para la banda Ku, ambos para el satélite Satmex 5.

En las antenas parabólicas cuanto más grandes son los reflectores, su capacidad para concentrar energía en un haz electromagnético muy angosto se incrementa; ilumina poco terreno, pero irradia con niveles muy altos de densidad de potencia, esto facilita y reduce el costo de las estaciones terrenas receptoras, ya que reciben señales de mayor intensidad. Cuanto más alta sea la frecuencia a la que la antena parabólica de dimensiones constantes trabaje, mayor es su capacidad de concentración de energía, ésta es una característica de las antenas llamadas de apertura, cuya capacidad de concentrar la potencia en un haz angosto es función directa de sus dimensiones eléctricas y no solo de las físicas.

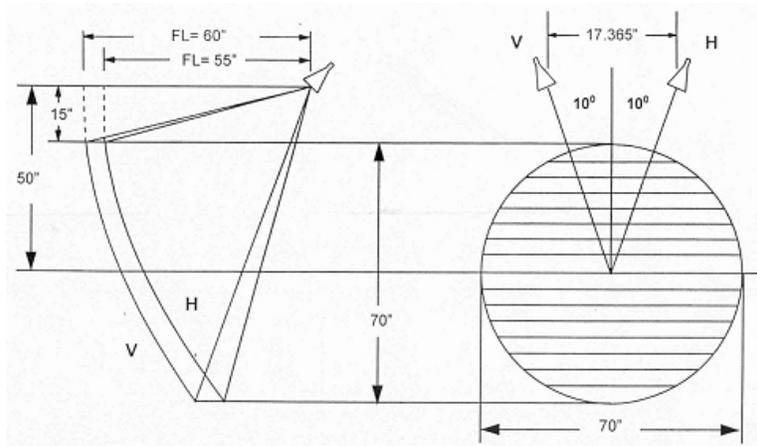
La forma de los reflectores (circular o pentagonal) esta en función de la optimización de espacio, ya que las antenas envuelven al satélite en el lanzamiento.

Satmex 5 utiliza dos reflectores en la banda Ku cuyas dimensiones son de 2.05 m x 2.56 m (80 x 100 pulgadas)



En la figura 3.3 se muestra las dimensiones reales de los reflectores para banda Ku de Satmex 5, así como la ubicación y distancia a la que se encuentra su alimentador de polarización horizontal y vertical.

Para la banda C, Satmex 5 tiene un reflector circular con un de diámetro de 1.79 m (70 pulgadas).



En la figura 3.4 se muestra las dimensiones reales del reflector para banda C del Satmex 5, así como la ubicación y distancia a la que se encuentra su alimentador de polarización horizontal y vertical.

Para los cálculos de enlace es necesario conocer la ganancia máxima de la antena de la siguiente manera:

$$G_{\max} = \eta \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \eta \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \dots (3.1)$$

en donde  $\eta$  es la eficiencia de la antena,  $A$  es el área física de su apertura y  $\lambda$  es la longitud de onda a la frecuencia de trabajo. Al producto de la eficiencia por el área física se le llama apertura o área efectiva ( $A_e = \eta A$ ). Lo común es expresar la ganancia en decibeles con relación a la ganancia unitaria de la antena isotópica [dBi]:  $[G]_{dBi} = 10 \log G \dots (3.2)$

pero se dificulta la obtención de ganancia para otras direcciones dentro del haz principal en los que la ganancia ya no es máxima. Para ello se implementaron las huellas de PIRE.

El PIRE o huellas de PIRE es un dato proporcionado por el fabricante de cada satélite para calcular los enlaces de bajada. Combina la ganancia  $G$  de la antena transmisora en una determinada dirección con la potencia total  $P_T$  que recibe del amplificador conectado a ella:

$$PIRE_{\text{del satélite}} = P_T G [W] \dots (3.3)$$

El PIRE o potencia isotrópica radiada efectiva es simplemente el producto de la potencia entregada a la antena por la ganancia de ésta en cierta dirección.

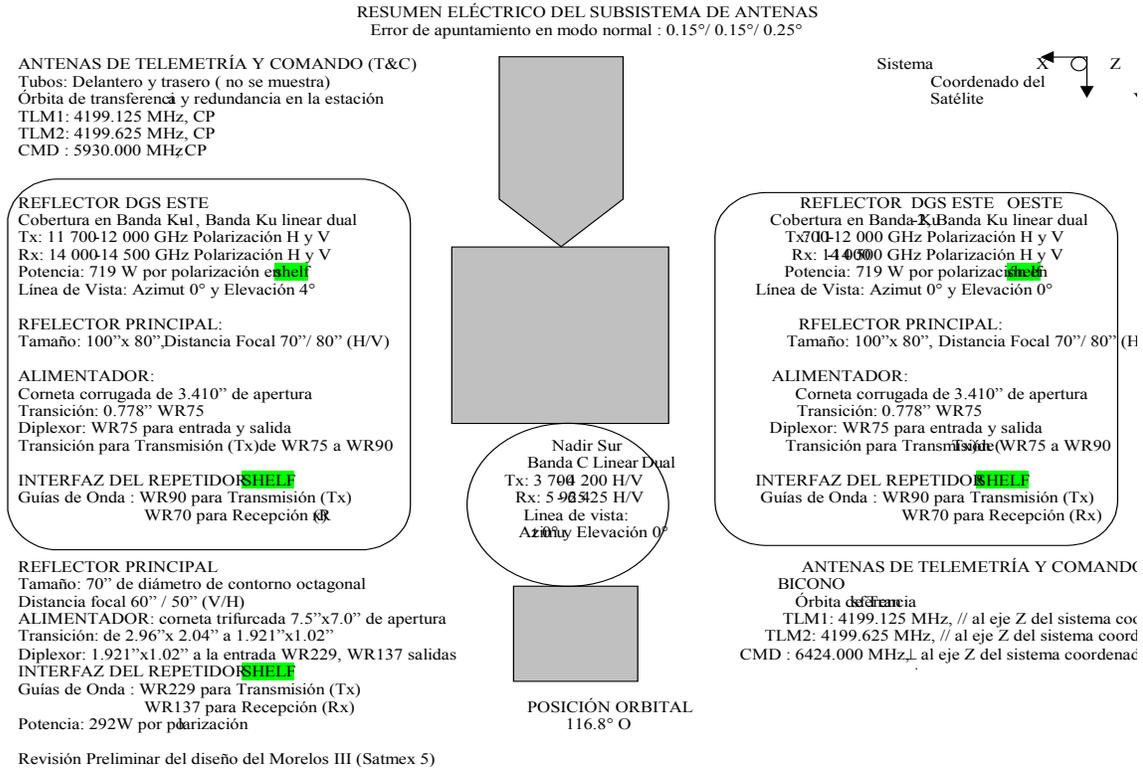
Pero requerimos los valores en dBW:  $[PIRE]_{dBW} = 10 \log PIRE [w] = 10 \log P_{Tw} + [G]_{dBi}$

Los contornos de PIRE proporcionados por el fabricante u operador corresponden a una determinada frecuencia, y como sabemos la ganancia de la antena cambia con la frecuencia dentro del rango de los enlaces descendentes. Éste y otros detalles hay que tenerlos en cuenta si se quiere hacer un cálculo muy preciso. En las huellas podemos ver que el PIRE decrece mientras mayor es la huella. (las huellas de PIRE se muestran en el capítulo correspondiente a comparación técnica 4.2). La utilidad de las huellas de PIRE para los enlaces de bajada ya fue expuesta. Análogamente en los enlaces de subida es útil emplear las huellas de  $G/T$  proporcionadas por el fabricante.  $G$  es la ganancia de la antena receptora del satélite y  $T$  es la temperatura total del ruido introducido durante todo el trayecto de subida. Como el patrón de radiación de las antenas con huella irregular es similar tanto en la transmisión como en la recepción, conviene usar los contornos de  $G/T$ , porque ya contienen la información de la ganancia de la antena (a la frecuencia de subida) en la dirección hacia donde está cierta ciudad, así como la temperatura del ruido proveniente de esa dirección.

Satmex 5	36 MHz Banda C	36 MHz Banda Ku
PIRE (dBW) en la orilla de la cobertura	39	Ku 1: 49.0 Ku 2: 46.0
G/T (dB/°K) en la orilla de la cobertura	-2	Ku 1: 0 Ku 2: -1.5
Densidad de flujo a saturación (dBW/m2)	-93	Ku 1: -93 Ku 2: -95

En esta tabla se muestran datos que Satmex proporciona a sus clientes de manera general acerca del Satmex 5; esta información se amplía más adelante.

Un satélite puede tener varias antenas receptoras o quizá solamente una, y cada una de ellas debe ser capaz de recibir al mismo tiempo muchos canales con información, que posteriormente serán amplificados por separado en distintos transpondedores. Es decir, las antenas receptoras, y lo mismo se aplica a las antenas transmisoras, tienen un ancho de banda muy grande. Como se mencionó anteriormente Satmex 5 cuenta con dos reflectores para la banda Ku y uno para la banda C.

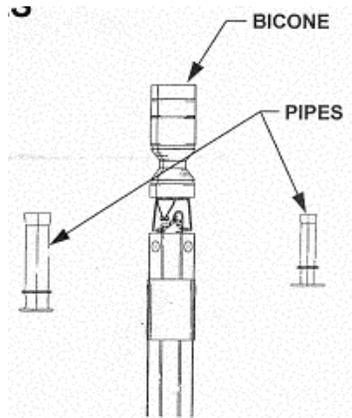


En la imagen 3.5 muestra en resumen algunas características de las antenas del Satmex 5. Estos 3 reflectores están basados en la teoría de rejillas duales extensibles de superficie perfilada.

Las antenas para comando y telemetría deben tener la características de radiación que les permita ser útiles tanto bajo condiciones normales como anormales de operación. En condiciones normales, los datos de telemetría y comando son preferentemente transmitidos vía los platos parabólicos de comunicaciones. También pueden usarse cornetas con cobertura global. Sin embargo, durante la colocación en órbita o en periodos anormales, es muy posible que los platos de comunicación estén plegados o que simplemente no apunten hacia la Tierra, según el caso. Es obvio que en esos momentos, es vital obtener información de telemetría y enviar comandos, y por ello los patrones de radiación de las antenas requeridas para estos casos críticos deben ser casi omnidireccionales (antena bicónica).

El sistema de antenas del subsistema de telemetría y comando está basado en una antena bicónica omnidireccional, la cual usa polarización lineal; y dos antenas “pipa” o de tubo; estas últimas utilizan una polarización circular derecha. La telemetría la realizan en la

frecuencia de 4199.125 MHz y 4199.625 MHz, así como el comando en la frecuencia de 5930.0 MHz para las de tubo y 6424.0 MHz para la bicónica.



En la figura 3.6 se muestran las antenas de telemetría y comando

Satmex 5 posee dos huellas de cobertura: NAFTA y Hemisférica. Tiene altos niveles de potencia en cobertura NAFTA que permite la transmisión de señales de televisión directa al hogar (DTH) a antenas menores de 1 m de diámetro. Cuenta con una huella en banda Ku dedicada a Norteamérica con excelente ángulo de elevación.

Satmex 5	36 MHz Banda C	36 MHz Banda Ku
Cobertura de las principales Ciudades de América Latina	México, Argentina, Venezuela, Colombia, Chile, América Central y el Caribe	Ku 1: México, Guatemala y Belice Ku 2: México, Argentina, Venezuela, Colombia, Chile, América Central y el Caribe
Cobertura de las principales Ciudades de Estados Unidos	Los Angeles, Nueva York, Miami, Chicago, San Francisco, Washington y Houston	Los Angeles, Dallas, Miami, Nueva York, San Francisco, Washington y Houston

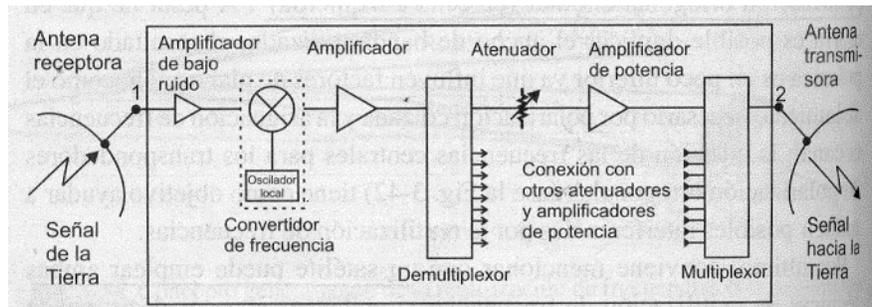
### 3.1.2 Subsistema de Comunicaciones

Recibe, amplifica y retransmite las señales enviadas por los usuarios.

Todas las señales provenientes de la Tierra con una determinada frecuencia dentro de cierta banda común, entran al satélite por medio de la antena receptora. En el interior del aparato las señales son separadas por grupos, amplificadas, tal vez procesadas digitalmente, y son trasladadas a frecuencias más bajas dentro del espectro electromagnético; posteriormente son amplificadas aún más y reagrupadas, para que todas salgan de regreso hacia la Tierra a través de la antena transmisora; el número de grupos o canales de radiofrecuencia que son amplificados y procesados es variable. Cada canal de radiofrecuencia tiene un ancho de banda de varios MHz y pueden contener uno, algunos o cientos de canales de datos, de

telefonía o de televisión, según las tasas de transmisión y técnicas empleadas de modulación, multiplexaje y acceso múltiple.

Para evitar confusiones, a cada canal de radiofrecuencia o de microondas se le refiere como transpondedor; así por ejemplo, un satélite típico tiene 24 transpondedores para una determinada banda de trabajo (C, Ku, Ka, etc.) y polarización. Un transpondedor es toda la cadena de unidades o equipos interconectados en serie del canal de banda ancha, desde la antena receptora hasta la antena transmisora, algunas unidades o equipos, por ejemplo el amplificador de bajo ruido o el demultiplexor de entrada, son comunes o compartidos entre todos los transpondedores.



En la figura 3.7 se muestra un transpondedor completo, el multiplexor y demultiplexor

La capacidad de tráfico de un satélite está limitada por dos factores: Ancho de banda (rango de frecuencias que hay entre la frecuencia más baja y la más alta de las que se transmiten) y potencia de los amplificadores. La UIT ha asignado para los satélites actuales de comunicaciones las bandas de VHF, UHF y SHF; dentro de UHF están las bandas L y S, mientras que la SHF contiene las bandas C, X, Ku y Ka. Los tres principales tipos de servicios definidos por la UIT y la FCC (*Federal Communications Commission*) de los Estados Unidos son conocidos como:

FSS = Fixed Satellite Service o servicio fijo por satélite

MSS = Mobile Satellite Service o servicio móvil por satélite

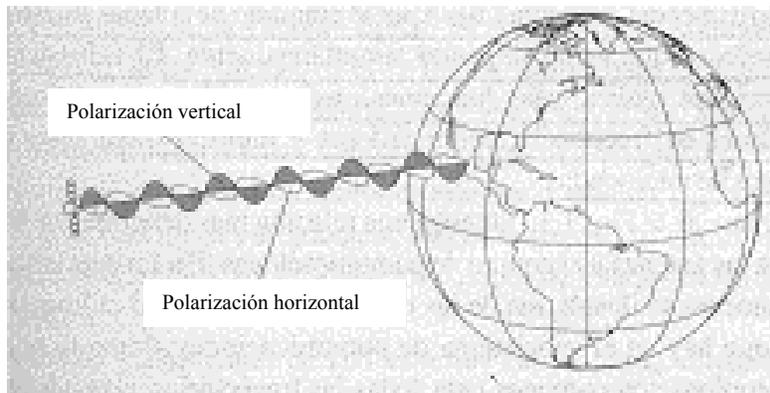
BSS = Broadcast Satellite Service o servicio de radiodifusión por satélite

La mayoría de los satélites corresponden a la categoría FSS.

Las bandas C y Ku son las más utilizadas actualmente por los satélites, sin embargo, también se ha comenzado a aprovechar la banda Ka, ya que su ancho de banda es de 3500 MHz, es decir, 7 veces mayor. Su principal desventaja es que cuando llueve, los niveles de atenuación a esta frecuencia son mucho mayores que en las bandas C y Ku; por ello la disponibilidad de diseño de los enlaces en banda Ka (típicamente 99.5%) es menor que la de los correspondientes en las bandas C y Ku (99.9%).

Banda [GHz]	Enlace ascendente [GHz]	Enlace descendente [GHz]	Servicio
C:6/4	5.925-6.425 (500MHz)	3.7-4.2 (500MHz)	FSS
Ku:14/12	14.0-14.5 (500MHz)	11.7-12.2 (500MHz)	FSS
Ku 17/12	17.3-17.8 (500MHz)	12.2-12.7 (500MHz)	BSS
Ka 30/20	27.5-31.0 (3500 MHz)	17.7-21.2 (3500MHz)	FSS

Es posible aumentar la capacidad de cada satélite usando dos trucos técnicos: aislamiento espacial y discriminación de polarización, desarrollados precisamente para utilizar las frecuencias asignadas por duplicado o un poco más, sin producir interferencias significativas. Estos "trucos" son conocidos como reutilización de frecuencias. Para Satmex 5 hablaremos de la discriminación de polarización. Ésta es efectuada mediante la transmisión simultánea en un mismo haz, a una frecuencia similar, pero con polarizaciones ortogonales. Recordando que la polarización de una señal electromagnética está asociada a la dirección de su campo eléctrico, la mayoría de los satélites emplean polarización ortogonal lineal (horizontal y vertical).



En la figura 3.8 se observa la polarización horizontal y vertical

En el caso de Satmex 5 se tiene discriminación de polarización en las bandas C y Ku, ambas emplean polarizaciones lineales. La telemetría y el comando emplean polarización circular derecha y lineal.

Los principales pasos del proceso del tratamiento de las señales son amplificar las señales a un nivel de potencia adecuado para que puedan ser recibidas a su regreso con buena calidad, así como cambiarlas de frecuencia para que salgan por el conjunto de antenas sin interferir con las señales que estén llegando simultáneamente. El sistema de comunicaciones realiza estas funciones mediante filtros, amplificadores, convertidores de frecuencia, conmutadores y multiplexores, entre otros dispositivos de microondas.

Algunos equipos son comunes para todas las trayectorias, pero además es normal que algunos de ellos se instalen repetidos para una misma trayectoria, es decir, que sean redundantes; para efectuar los cambios se cuenta con conmutadores que hacen la conexión de un elemento a otro.

En cada una de estas bandas, el ancho de banda de operación, o sea, el rango de frecuencias disponibles, es de 500 MHz para transmisión y 500 MHz para recepción. Existen satélites denominados híbridos, que tienen los equipos necesarios para trabajar simultáneamente tanto en la banda C como en la Ku. Es el caso de Satmex 5 y 6.

En la banda C, las frecuencias que se utilizan para transmitir de la Tierra hacia el satélite están entre 5.925 y 6.425 GHz, con una frecuencia central de 6.175 GHz. La antena receptora del satélite detecta todas estas frecuencias, pues su ancho de banda de recepción es mayor que 500 MHz. Los transpondedores, entre otras funciones, cambian las frecuencias de todas las señales contenidas en ese rango, bajándolas a otro de igual ancho de banda, pero cuyos límites inferior y superior son, respectivamente, 3.7 y 4.2 GHz; posteriormente, todas las señales contenidas en estas últimas frecuencias son entregadas a la antena transmisora para que las envíe de regreso a la Tierra. Un enlace de este tipo se representa con la nomenclatura 6/4 GHz, indicando que la señal sube al satélite con frecuencias cercanas a los 6 GHz y que baja con frecuencias cercanas a los 4 GHz. En la banda Ku, el proceso de recepción, conversión de frecuencias y transmisión es similar al de la banda C, sólo que las frecuencias Tierra-satélite están entre 14.0 y 14.5 GHz para el servicio fijo, con una frecuencia central de 14.25 GHz, y las frecuencias satélite-Tierra están entre 11.7 y 12.2 GHz; en este caso, el enlace se representa con la nomenclatura 14/12 GHz.

La atenuación por propagación aumenta con la frecuencia, y como los satélites tienen potencia limitada, en cada banda siempre se usan las frecuencias más altas para el enlace de subida. En las estaciones terrenas no hay tanto problema de potencia de transmisión, por lo que para el enlace de bajada se usan las frecuencias más bajas. De modo que, por ejemplo, 6/4 GHz o 4/6 GHz es interpretado de la misma forma.

Por conveniencia, el ancho de banda de 500 MHz se divide en espacios o segmentos, cuyo número depende de la aplicación del satélite. Los espacios libres entre segmentos adyacentes se dejan para disminuir la posibilidad de interferencia entre las señales que cada uno contiene, y por ello se denominan bandas de guarda.

La antena receptora del satélite capta las frecuencias que corresponden al rango de los 24 transpondedores, es decir, por ella entran diferentes clases de señales al mismo tiempo. Para la antena eso no representa ninguna dificultad, pero no es fácil construir aparatos electrónicos de alta potencia que realicen sus funciones de amplificación óptimamente con todas esas señales al mismo tiempo. Es necesario aislarlas para procesarlas y amplificarlas por separado.

El primer dispositivo electrónico importante que encuentran las señales recibidas por la antena es un amplificador de bajo ruido, con poca potencia de salida; este aparato genera internamente poco ruido, que se suma a las señales originales que entran a él para amplificación. Todos los dispositivos electrónicos generan ruido, principalmente por su calentamiento. La primera etapa de amplificaciones es muy importante, porque cualquier señal que es recibida por la antena es muy débil; es muy importante que el ruido generado por este primer dispositivo de amplificación, común para todos los transpondedores de una misma banda de trabajo, sea lo más bajo posible, y de ninguna manera comparable en magnitud a ninguna de las débiles señales que están entrando en él. Las estaciones terrenas

receptoras también llevan un amplificador de bajo ruido inmediatamente después de la antena. El amplificador de bajo ruido debe ser capaz de amplificar al mismo tiempo todas las señales recibidas por la antena.

Cuando las señales han alcanzado un nivel adecuado, pasan por un dispositivo conocido como convertidor de frecuencia, que no es más que un oscilador local que multiplica las señales que entran por otra generada internamente; las señales obtenidas a la salida del aparato son similares a las que entraron, por lo que respecta a su contenido, pero han sido desplazadas a frecuencias más bajas en el espectro radioeléctrico. Después de amplificar y cambiar la frecuencia de las señales, el siguiente paso es separarlas en grupos o bloques. La separación se realiza con un demultiplexor, que tiene un solo conducto de entrada y varios de salida. A éste entra la información completa de 500 MHz de ancho de banda, y en su interior, mediante filtros, se separan los canales en bloques de 36 MHz cada uno. A continuación, cada bloque pasa por una etapa muy fuerte de amplificación, proporcionada por un amplificador de potencia, y después todos los bloques son reunidos nuevamente en un solo conjunto de 500 MHz de ancho de banda, a través de un multiplexor, conectado a la antena transmisora del satélite.

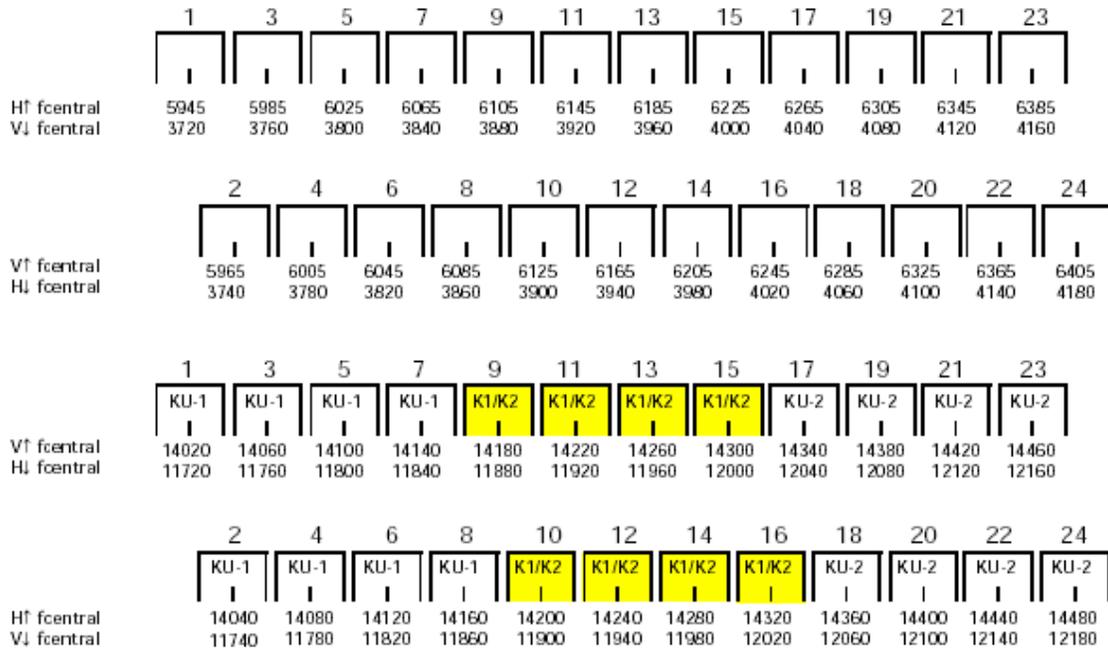
Después de cada salida del demultiplexor hay un atenuador de microondas o resistencia variable; éste sirve para disminuir a control remoto, y en distinto grado, la intensidad del bloque de señales que entran a cada amplificador de potencia, o a la primera etapa de amplificación si es que hay más de una. La regulación de la intensidad de entrada permite operar al amplificador de potencia en distintas condiciones o puntos de trabajo.

Todo tipo de información que se transmite al satélite tiene una frecuencia asignada, denominada portadora. La portadora es una señal senoidal de muy alta frecuencia (frecuencia portadora) que es modulada por la información que se desea transmitir o portar sobre ella.

Los niveles de interferencia se reducen si se cambia la polarización de las señales antes de retransmitirlas, es decir, las señales que llegan al satélite con polarización vertical son enviadas a la Tierra con polarización horizontal y viceversa.

El Satélite Satmex 5 es un híbrido; tiene 24 transpondedores de 36 MHz en la banda C, así como otros 24 en la banda Ku, también de 36 MHz cada uno. En el plan de frecuencia del Satmex 5, la frecuencia central de cada transpondedor se indica debajo de su bloque correspondiente, en MHz, como para el enlace de subida como para el de bajada. Debe resaltarse el cambio de polarización de horizontal a vertical o viceversa entre ambos enlaces de subida y bajada. También debe observarse el desplazamiento de las frecuencias centrales de los transpondedores pares con relación a las de los impares; la frecuencia central de los impares queda dentro de la banda de guarda de los pares, y viceversa.

### SATMEX 5 FREQUENCY PLAN



FREQUENCY PLAN & POLARIZATION  
C BAND

Tp	Uplink	Downlink	Band	Polarization Up/Down	Region
1N	5.945	3.720	C	H/V	C1
3N	5.985	3.760	C	H/V	C1
5N	6.025	3.800	C	H/V	C1
7N	6.065	3.840	C	H/V	C1
9N	6.105	3.880	C	H/V	C1
11N	6.145	3.920	C	H/V	C1
13N	6.185	3.960	C	H/V	C1
15N	6.225	4.000	C	H/V	C1
17N	6.265	4.040	C	H/V	C1
19N	6.305	4.080	C	H/V	C1
21N	6.345	4.120	C	H/V	C1
23N	6.385	4.160	C	H/V	C1
2N	5.965	3.740	C	V/H	C1
4N	6.005	3.780	C	V/H	C1
6N	6.045	3.820	C	V/H	C1
8N	6.085	3.860	C	V/H	C1
10N	6.125	3.900	C	V/H	C1
12N	6.165	3.940	C	V/H	C1
14N	6.205	3.980	C	V/H	C1
16N	6.245	4.020	C	V/H	C1
18N	6.285	4.060	C	V/H	C1
20N	6.325	4.100	C	V/H	C1
22N	6.365	4.140	C	V/H	C1
24N	6.405	4.180	C	V/H	C1

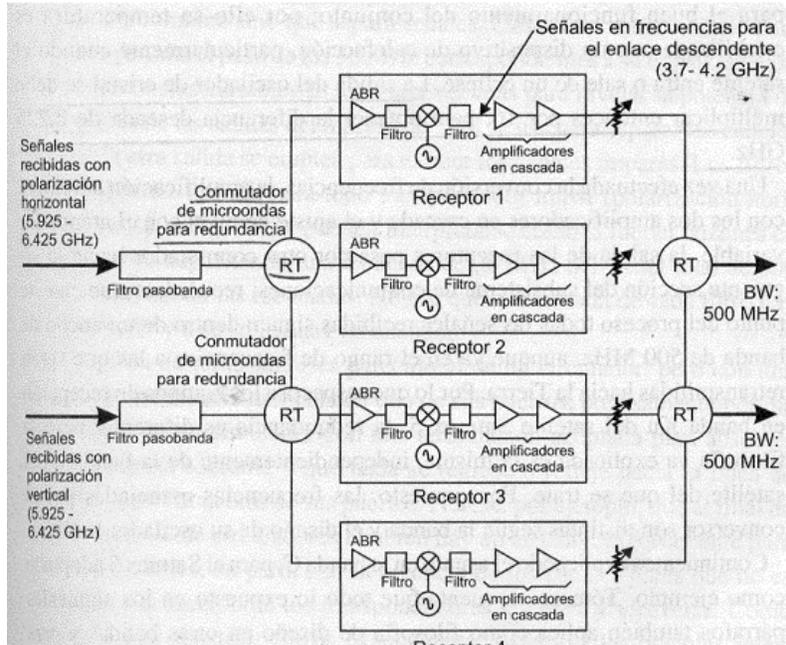
FREQUENCY PLAN & POLARIZATION  
Ku BAND

Tp	Uplink	Downlink	Band	Polarization Up/Down	Region
1K	14.020	11.720	Ku	V/H	Ku1
3K	14.060	11.760	Ku	V/H	Ku1
5K	14.100	11.800	Ku	V/H	Ku1
7K	14.140	11.840	Ku	V/H	Ku1
9K	14.180	11.880	Ku	V/H	Ku1/2
11K	14.220	11.920	Ku	V/H	Ku1/2
13K	14.260	11.960	Ku	V/H	Ku1/2
15K	14.300	12.000	Ku	V/H	Ku1/2
17K	14.340	12.040	Ku	V/H	Ku2
19K	14.380	12.080	Ku	V/H	Ku2
21K	14.420	12.120	Ku	V/H	Ku2
23K	14.460	12.160	Ku	V/H	Ku2
2K	14.040	11.740	Ku	H/V	Ku1
4K	14.080	11.780	Ku	H/V	Ku1
6K	14.120	11.820	Ku	H/V	Ku1
8K	14.160	11.860	Ku	H/V	Ku1
10K	14.200	11.900	Ku	H/V	Ku1/2
12K	14.240	11.940	Ku	H/V	Ku1/2
14K	14.280	11.980	Ku	H/V	Ku1/2
16K	14.320	12.020	Ku	H/V	Ku1/2
18K	14.360	12.060	Ku	H/V	Ku2
20K	14.400	12.100	Ku	H/V	Ku2
22K	14.440	12.140	Ku	H/V	Ku2
24K	14.480	12.180	Ku	H/V	Ku2

En la figura 3.9 se presenta el plan de frecuencias del Satmex 5. Los canales de la banda Ku sombreados son conmutables entre la K1 y K2 según demanda.

Entre la antena y la entrada del ABR se coloca un filtro paso banda con el fin de atenuar todas las señales que estén fuera de la banda deseada.

Para el Satmex 5 el amplificador de bajo ruido está integrado con transistores FET y tiene una figura de ruido típica de 1.5 dB y una ganancia de 59 dB en la banda C; en la banda Ku los valores típicos son de 1.6 dB y 60 dB. La conversión de frecuencia es más eficiente cuando se efectúa a niveles bajos de potencia; dicha conversión también puede hacerse en una o varias etapas. El satélite Satmex 5 utiliza una conversión de frecuencia de una etapa, tanto para los ABR de banda C como para los de banda Ku.



En la figura 3.10 se muestra a grandes rasgos el subsistema de comunicaciones Satmex 5

Para la banda C se tiene una redundancia de 4/2 receptores (6/4 receptores para banda Ku); es decir, hay cuatro pero solo se necesitan dos funcionando a la vez. Las señales que llegan con polarización horizontal pasan por el filtro paso banda y después se encuentran con un conmutador de microondas para implementar la redundancia. Las señales con polarización horizontal entran al conmutador y pueden tener acceso a los receptores 1, 2 y 3; en tanto, las señales con polarización vertical tienen acceso a los receptores 2, 3 y 4 a través de su conmutador correspondiente. Los receptores 1 y 4 son los primarios, es decir, los que funcionan normalmente; si uno de ellos llega a fallar, entonces se envía un comando al satélite para efectuar la conmutación a otro receptor.

Para pasar del rango de frecuencias de 5.925- 6.425 GHz al de 3.7-4.2 GHz se necesita una diferencia de 2.225 GHz, la cual es proporcionada por el oscilador de cristal local y un multiplicador de frecuencias en serie.

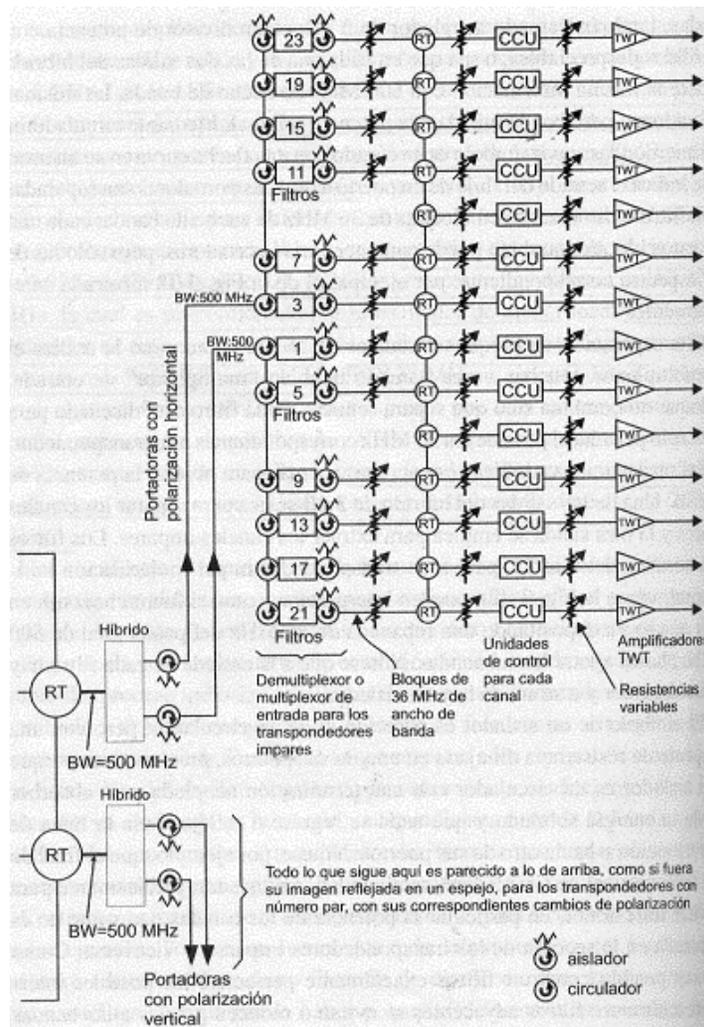
Entre cada conmutador RT y cada amplificador TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier) hay una unidad de control de canal o CCU (Channel Control Unit) la cual, por medio de comandos enviados desde el centro de control en la Tierra, ajusta el control de ganancia de ese canal en pasos de 1 dB, desde +3 hasta -15 dB, para que el TWTA trabaje en cierto punto de operación, en el caso de los TWTA de banda C del Satmex 5, la potencia máxima de salida de cada TWTA (en saturación) es 36W. Posteriormente todos los canales

amplificados o salidas de los TWTA son combinados por medio de conmutadores RT y un multiplexor de salida, para ser retransmitidos hacia la Tierra a través de sus antenas correspondientes.

Satélite	Banda C	Banda Ku
Satmex 5	36W (TWTA)	132W (TWTA)

En la etapa de alta amplificación hay 32 (banda C) y 32 (banda Ku) amplificadores de tubos de ondas progresivas o TWTA para los 24 canales de 36 MHz provenientes de los filtros paso banda, o sea que sobran 8 respectivamente que se ocupan para la redundancia.

Satmex 5	36 MHz Banda C	36 MHz Banda Ku
Redundancia	32 TWTA para 24 canales	32 TWTA para 24 canales



En la figura 3.11 se muestran algunos canales de Satmex 5 con mayor detalle

En esta tabla se muestra la redundancia de los transpondedores del subsistema de comunicaciones

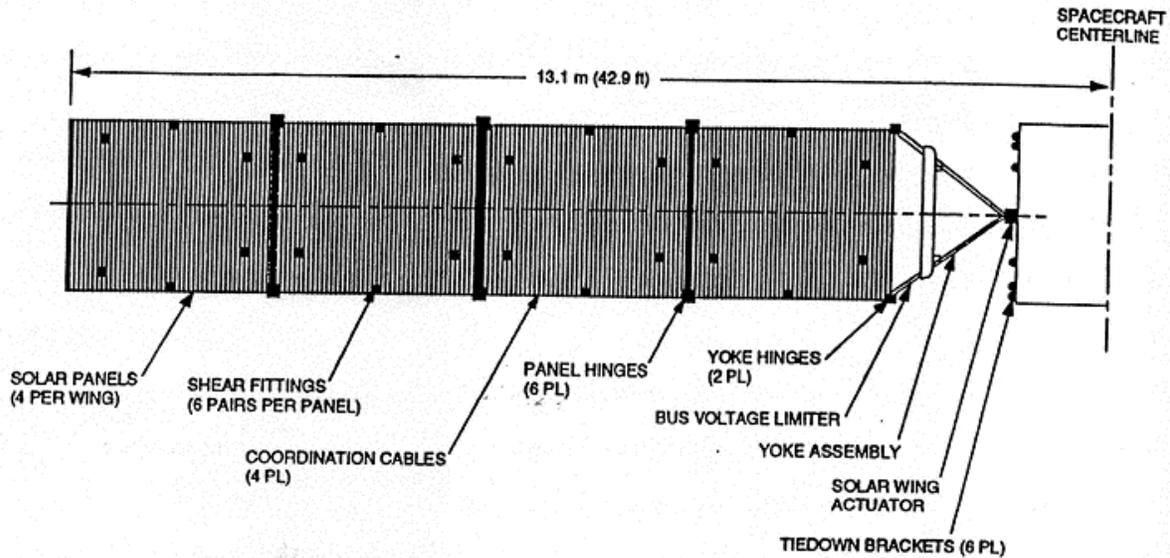
Transpondedores Ku-1	12 transpondedores activos de 75.6 W de RF de potencia de salida
Redundancia	16 por 12
Conmutación	4 transpondedores individualmente conmutables entre Ku-1 y Ku-2
Transpondedores Ku-2	12 transpondedores activos de 132 W de RF de potencia de salida
Redundancia	16 por 12
Conmutación	4 transpondedores individualmente conmutables entre Ku-1 y Ku-2
Transpondedores C	24 transpondedores activos de 110 W de RF de potencia de salida
Redundancia	Un anillo de 30 por 24

### 3.1.3 Subsistema de Energía Eléctrica

Su principal función es generar, acondicionar, y distribuir la energía eléctrica necesaria para mantener operando todos los equipos en el satélite.

Para funcionar adecuadamente todo satélite necesita un suministro de potencia eléctrica sin interrupción y sin variaciones significativas en los niveles de voltaje y corriente. La cantidad de potencia requerida por cada uno en particular depende del modelo y de sus características de operación, y actualmente varía entre 1 y 20 kilowatts.

El subsistema de energía eléctrica consiste en tres elementos fundamental: una fuente primaria, una fuente secundaria y un acondicionador de potencia (bus); este último está integrado por dispositivos como reguladores, convertidores y circuitos de protección que permiten regular y distribuir la electricidad con los niveles adecuados a cada una de las partes del satélite. La fuente primaria del satélite está constituida por arreglos de celdas solares; el satélite Satmex 5 cuenta con dos alas de 4 paneles cada una; los 4 paneles de cada ala contienen 64 circuitos para el arreglo solar.



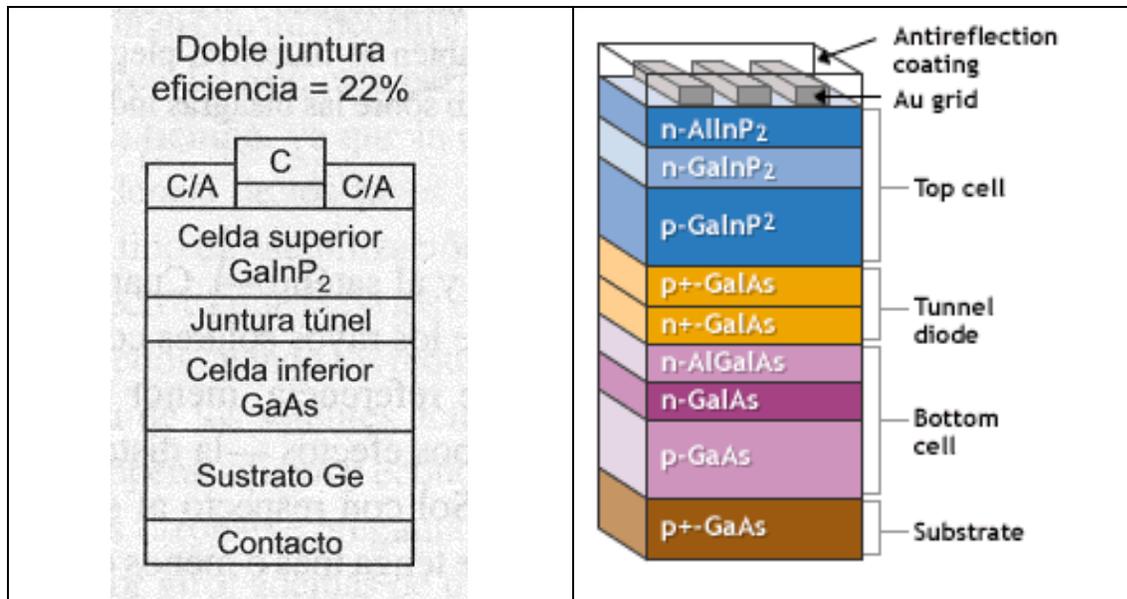
En la figura 3.12 se aprecian los 4 paneles de una de las alas del satélite Satmex 5 así como las partes de la que se compone.

La desventaja de las celdas solares es la baja eficiencia en la conversión de energía solar a eléctrica. En un principio era de 8%, pero ahora ya existen celdas con tecnología de triple juntura que brinda factores de eficiencia de 25%, aun así esta eficiencia es baja. El silicio ha sido sustituido por Arseniuro de Galio.

Hoy en día, los dispositivos fotovoltaicos (FV) más comunes usan juntas o interfases para crear un campo eléctrico dentro de un semiconductor, como por ejemplo una celda FV. En una celda FV de una sola juntura, solamente aquellos fotones cuya energía sea igual o mayor al del ancho de banda del material de la celda, pueden liberar un electrón para ser usado en un circuito eléctrico. En otras palabras, la reacción fotovoltaica de las celdas de una sola juntura está limitada a la porción del espectro solar cuya energía esté por encima del ancho de banda del material absorbente, y por tanto aquellos fotones con energías más bajas no son utilizados. Una manera de sortear esta limitación es usando dos (o más) celdas diferentes, con más de un espacio de banda y más de una juntura, para generar un voltaje. Este tipo de celdas son conocidas como celdas "multijuntura" (también llamadas celdas "de cascada" o "tandem").

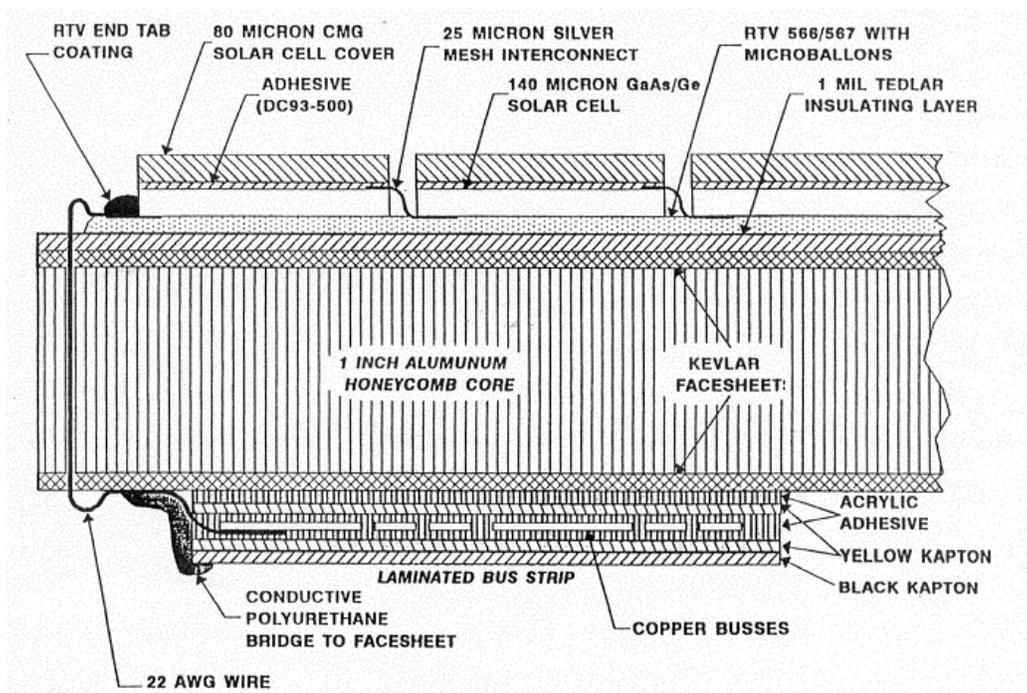
El dispositivo multijuntura utiliza una celda superior de fosfato de indio con galio, una juntura "de túnel" para facilitar el flujo de electrones entre las celdas, y una celda inferior de arseniuro de galio. Estos materiales tienen diferentes intervalos de bandas y parecen estar sintonizados a diferentes longitudes de onda o a fotones con diferentes energías. Se ha probado que el uso de dos o más capas de diferentes materiales con diferentes intervalos de bandas de energía resulta ser muy eficiente. El material con mayor banda se coloca en la superficie y más abajo los que requieren fotones con menor energía.

La eficiencia para las células de doble juntura con las que cuenta el Satmex 5 es de 21.6%.



En la figura 3.13 se observa la estructura de las celdas de doble junta usadas por Satmex 5.

Satmex 5 tiene un diseño que lo dota con más de 7000 Watts de potencia para la operación de la carga útil proporcionada por sus celdas solares de Arseniuro de Galio de doble junta (empalme dual)



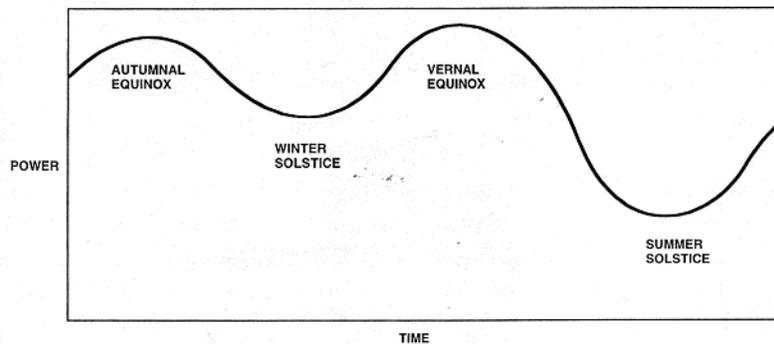
En la figura 3.14 se muestra el perfil de una de las alas del Satmex 5, la parte de atrás de los paneles es de aluminio y sirve a su vez como radiador.

Cuando el satélite se encuentra a la distancia de una unidad astronómica (es la longitud del semieje mayor de la órbita elíptica de la tierra alrededor del Sol (aproximadamente igual a 150 millones de kilómetros) la intensidad promedio de la radiación solar sobre sus celdas es de 1370 Watts por cada metro cuadrado de superficie.

La intensidad de la radiación solar sobre las celdas del satélite no es constante, puesto que éste se acerca o aleja del Sol junto con la tierra al desplazarse alrededor de él. Hay que tomar en consideración que el eje de rotación de la Tierra está inclinado con respecto a la elíptica y que el ángulo de incidencia de los rayos del Sol sobre la Tierra cambia según la época del año, conforme ambos orbitan a su alrededor.

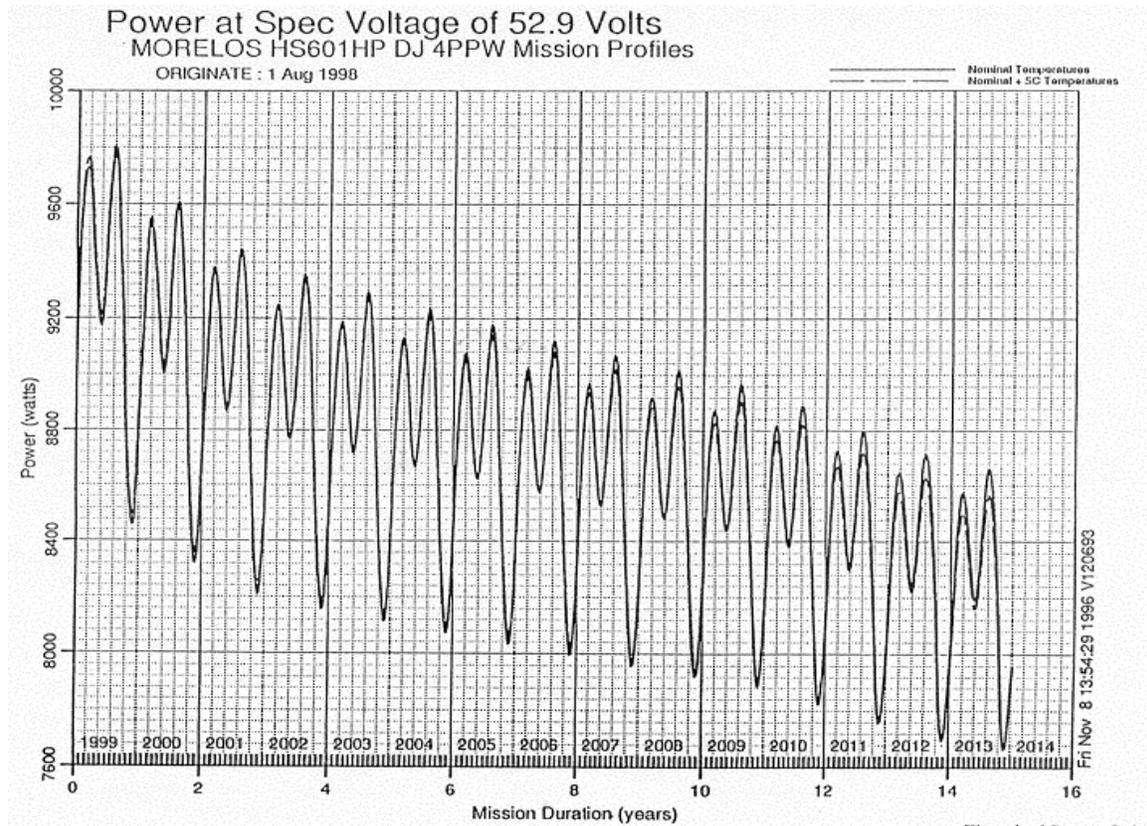
Cuanto mayor sea la desviación del ángulo de incidencia de los rayos solares con respecto a una incidencia normal de referencia, menor es la conversión de energía.

Así pues, la distancia del satélite al Sol, así como el movimiento aparente del Sol con respecto al satélite ocasionan variaciones en la energía disponible, la energía es máxima en los equinoccios y mínima en los solsticios. Los satélites de cuerpo fijo con estabilización triaxial cuentan con un mecanismo para orientarse constante y óptimamente hacia el Sol, ya que la eficiencia de conversión es función del ángulo de incidencia de los rayos del Sol sobre ellas; en su interior hay volantes inerciales que actúan como giroscopios y que mantienen estable al satélite sin necesidad de que éste gire.



En la figura 3.15 se muestran los niveles de energía producidos por el satélite dependiendo de la época del año.

Año tras año la eficiencia de las celdas solares va disminuyendo; después de varios años en operación la reducción puede ser hasta del 20% con respecto a la original a pesar de que lleva una cubierta de protección. Este daño se debe en mayor medida a la radiación solar, sin embargo los pequeños meteoritos y el polvo espacial afectan también su desempeño.



En la figura 3.16 se muestra la expectativa de como los niveles de potencia irán disminuyendo año con año para el Satmex 5.

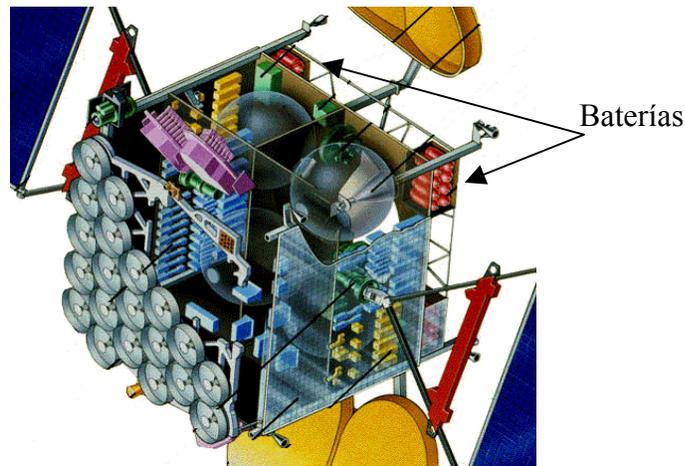
La corriente regulada que el satélite suministra se da por un bus que proporciona 52 V a los circuitos electrónicos que lo requieren, en realidad el rango es de 52 a 53.15 V.

Este subsistema también proporciona protección al bus de distribución en contra de corrientes no deseadas que provienen de cada una de las cargas, a través de fusibles. La unidad de distribución de potencia del bus realiza funciones de switcheo para la propulsión y los mecanismos de control de temperatura. Posee reguladores de corriente de comando serial.

Como se mencionó, la fuente secundaria del satélite está constituida por las baterías, aunque en realidad solo es una constituida por 32 células de NiH<sub>2</sub> y producen la energía necesaria durante los eclipse, aproximadamente 350 A-hr, y cada una de estas células es de 5.5 pulgadas de diámetro. Estas células se agrupan en cuatro paquetes de 8 y entre todas son capaces de producir 8323 W.

Se debe tener un especial cuidado en la temperatura de las células, ya que éstas varían con las bajas temperaturas y reducen la corriente que deben producir y el voltaje regulado.

La recarga de las baterías es en 15.2 horas en los solsticios y 17.7 horas en los equinoccios.



En la parte posterior derecha de la figura 3.17 se observan los paquetes de baterías.

Los factores más críticos para este subsistema y que deben estar bien controlados son el ángulo entre los paneles solares y el Sol, la temperatura de la baterías, la recarga de la baterías y el tiempo de duración de los eclipses.

### 3.1.4 Subsistema de Control Térmico

Mantiene la temperatura de los dispositivos dentro de ciertos intervalos de operación.

Es necesario obtener un balance o equilibrio térmico del satélite. Uno de los factores que intervienen en dicho equilibrio es el calor generado constantemente por el satélite en su interior, cuya principal contribución proviene de los amplificadores de potencia; la energía que absorbe del Sol y de la Tierra son otros factores que deben considerarse también. La suma del calor generado internamente por el satélite más el producido por la absorción de energía del Sol y de la Tierra, menos el radiado por el satélite hacia el exterior, se debe mantener lo más constante posible, es decir, con pocas variaciones.

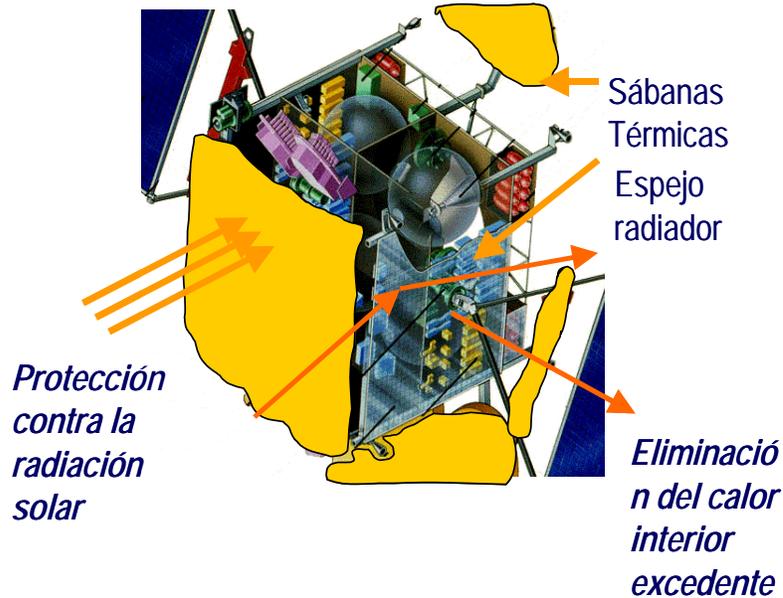
Este subsistema es vital cuando ocurre un eclipse, ya que el satélite cambia bruscamente de temperatura, tanto al quedar en la oscuridad, como al ver nuevamente los rayos del Sol.

La transferencia de calor sobrante del satélite al vacío se efectúa por radiación, en su interior también se produce una ligera transferencia de calor pero por conducción.

Las caras norte y sur de los satélites triaxiales van cubiertas con un reflector óptico de cuarzo, semejante a un gran espejo, que rechaza el calor del exterior y al mismo tiempo lo transfiere del interior al vacío; los dispositivos que generan más calor, como los amplificadores de potencia, se colocan junto a él. Estos espejos actúan como filtros, ya que

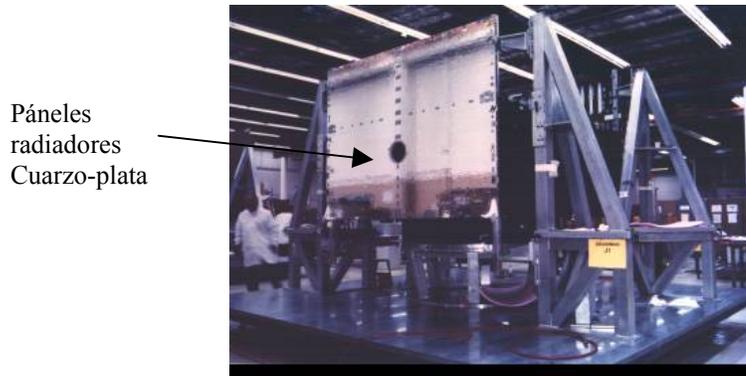
reflejan la radiación de luz visible y ultravioleta del Sol, y permiten al paso de la radiación infrarroja de los aparatos electrónicos hacia el espacio.

Ciertos módulos internos y las antenas son cubiertos con algún tipo de material aislante (kaptón, kevlar, mylar, drácon) que los protege del calor o de los cambios bruscos de temperatura.



En la figura 3.18 se muestran las sábanas térmicas y los espejos radiadores

Los colores juegan un papel importante en el acabado de las partes del satélite, dependiendo del lugar que ocupe, su emitancia y absorvencia de cada parte; por ejemplo, la pintura blanca absorbe la radiación infrarroja de la Tierra, pero rechaza el flujo solar; su emitancia es muy alta y absorvencia muy baja, de manera que se comporta como un elemento frío frente al Sol. La pintura negra también tiene una emitancia alta, pero al mismo tiempo posee una absorvencia muy alta. La pintura de aluminio tiene una emitancia muy baja, así como absorvencia baja, las zonas recubiertas con pintura de aluminio son más calientes en la oscuridad.



En la figura 3.19 se muestran en el costado izquierdo los paneles radiadores.

Como se mencionó anteriormente, durante los eclipses la temperatura del satélite disminuye considerablemente y es en ese momento cuando las baterías entran en funcionamiento, sin embargo, las baterías son muy sensibles a las bajas temperaturas, ya que éstas varían con las bajas temperaturas y reducen la corriente que deben producir y el voltaje regulado. Para solucionar esto, las baterías necesitan calefactores en cuanto la temperatura comience a disminuir, se utilizan para ello, caloductos que distribuyen en el interior el calor emitido por los amplificadores de potencia, así como calentadores eléctricos activados por termostatos o a control remoto.

Otra parte esencial en el control térmico es en todo el recorrido del propelente, este debe de mantenerse a temperaturas mayores de  $10^{\circ}\text{C}$ , lejos del punto de congelación a los  $-12^{\circ}\text{C}$ .

También los propulsores deben mantenerse a temperaturas mayores de  $41^{\circ}\text{C}$ .

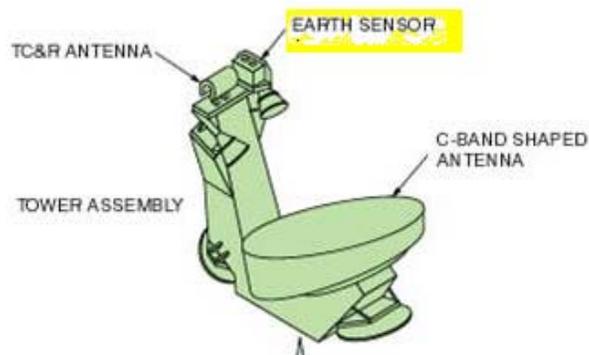
### **3.1.5 Subsistema de Posicionamiento y Orientación**

Mantiene orientado al cuerpo del satélite y principalmente a sus antenas. Detecta errores de posición con algunos sensores que tiene a bordo y los corrige con mecanismos de autocontrol.

Las fuerzas perturbadoras en el espacio no dejan de provocar cambios en la posición del satélite sobre su órbita y en su orientación con respecto a la superficie de la Tierra; por ello, es necesario mantener estable la orientación de la estructura del satélite con respecto a ella, lo cual se obtiene mediante técnicas de estabilización triaxial; dicha estabilización se conserva mediante volantes giratorios que van colocados en su interior, sobre cada uno de los ejes utilizados como referencia para definir la orientación del satélite hacia la superficie terrestre.

Para conocer la posición, se requiere medir la distancia a la que se encuentra y en qué dirección o ángulo con relación a algún punto de referencia sobre la Tierra. La distancia se mide transmitiendo una señal piloto hacia el satélite, que éste retransmite después, y la diferencia que se detecta en el centro de control entre las fases de la señal transmitida y la recibida, junto con el tiempo de rastreo, es un indicador de lo lejos que el aparato se encuentra. La medición del ángulo o la dirección en la que se halla se puede hacer por interferometría, empleando dos estaciones separadas por cierta distancia y comparando las señales piloto recibidas por cada una de ellas.

Para la determinación de la orientación del cuerpo del satélite con relación a la superficie terrestre, se puede utilizar para ello una variedad de sensores, de los cuales los más comunes son los de Sol, de Tierra y de radiofrecuencia. Los sensores solares son dispositivos fotovoltaicos en los que se producen una corriente eléctrica cuya magnitud depende de la dirección de la radiación solar sobre ellos. Por otra parte, los sensores de Tierra miden la radiación infrarroja emitida por el planeta, utilizan para ello un dispositivo sensible al calor, como un bolómetro o una termopila. Las nuevas generaciones utilizan el método de sensores de radiofrecuencia que detectan y miden las características de radiofaros o señales radioeléctricas transmitidas desde la estación terrena; los sensores determinan con gran precisión la diferencia angular que hay entre el eje principal de radiación de la antena del satélite y la línea o trayectoria de las ondas de radio del radiofaro o haz piloto.

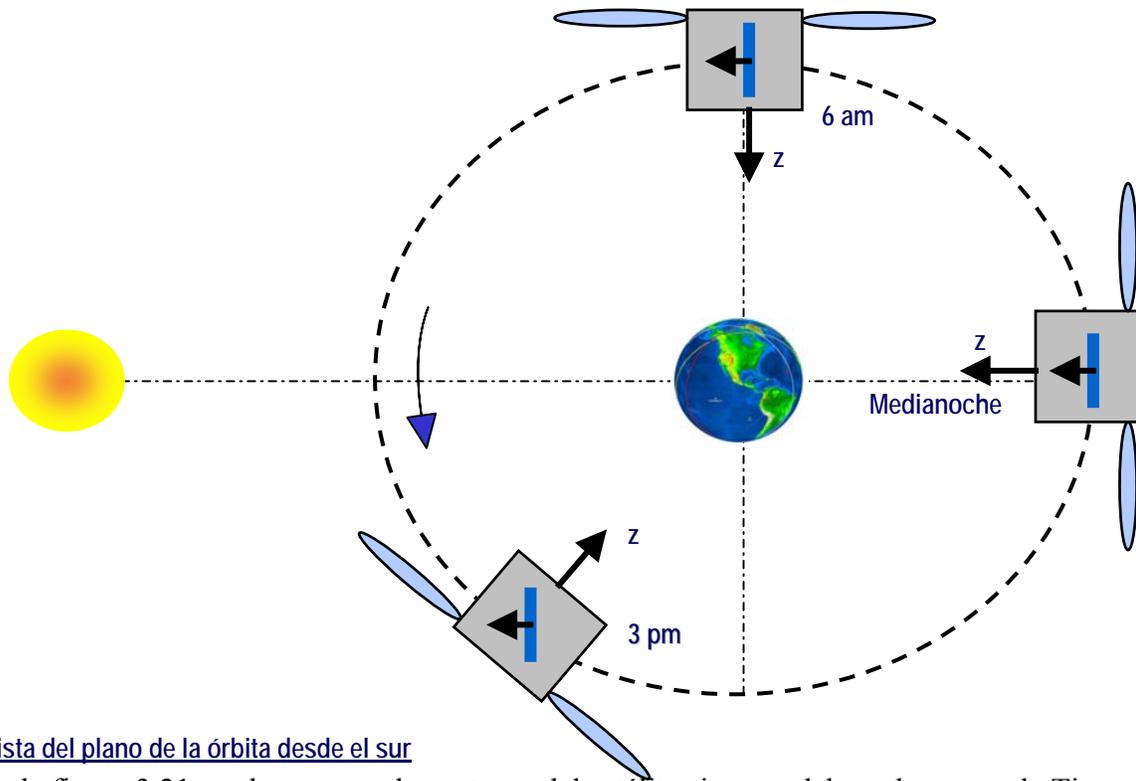


En la imagen 3.20 se puede observar la ubicación del sensor de tierra en la estructura del satélite, justo a un lado del alimentador de banda C.

El procedimiento de corrección de la posición y orientación del satélite se basa en comparar los resultados de las mediciones de los sensores con respecto a valores de referencia considerados como correctos, calcular a continuación las correcciones que deben hacerse para reducir esos errores o diferencias, y finalmente llevarlas a cabo mediante la operación de algún actuador o conjunto de actuadores montados en el satélite; el flujo de la información correspondiente se realiza por el subsistema de rastreo, telemetría y comando.

Como se mencionó con anterioridad, Satmex 5 cuenta con un mecanismo para orientarse constante y óptimamente hacia el Sol, ya que la eficiencia de conversión es función del ángulo de incidencia de los rayos del Sol sobre ellas; para ello cuenta con 4 sensores para la detección del Sol, y la actualización de la ubicación de este se hace una vez por día para ajustar el ángulo de incidencia sobre los paneles solares.

La emisión infrarroja de la tierra sirve de guía al satélite para controlar su orientación.

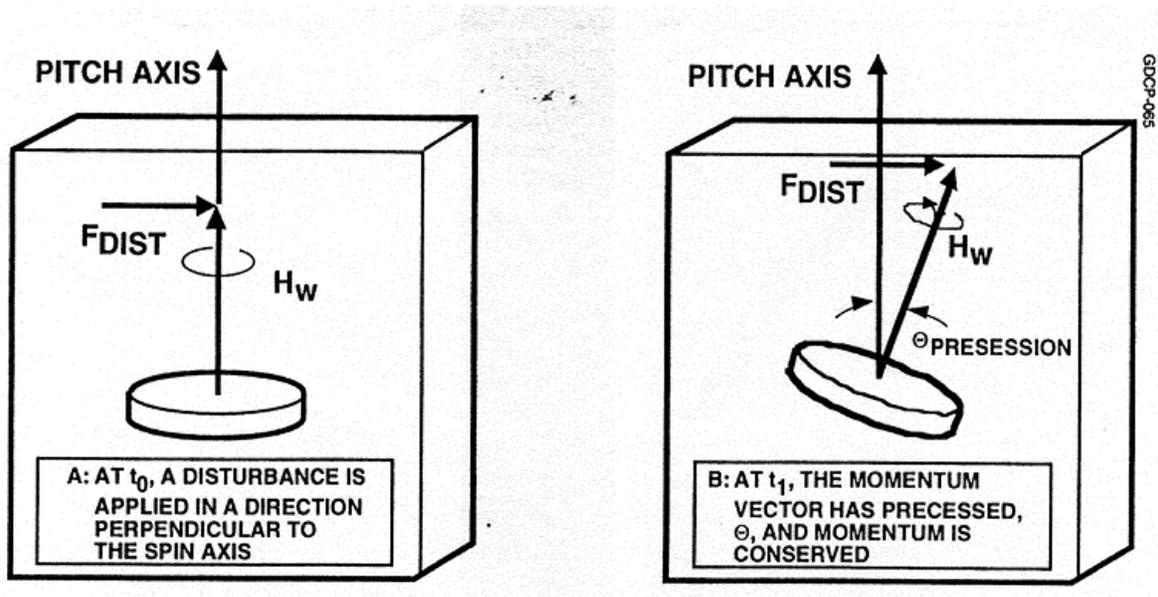


Vista del plano de la órbita desde el sur

En la figura 3.21 se observa que las antenas del satélite siempre deben observar a la Tierra aunque esté girando alrededor de ella. En este caso las alas estarían entrando y saliendo de la hoja apuntando hacia el Sol.

Satmex 5 cuenta con 2 unidades de referencia internas, las cuales proveen datos del cuerpo del satélite acerca de los ejes del satélite. También se cuenta con un sensor para la altitud respecto a Tierra y un par de indicadores horizontales usados durante el ascenso y la transferencia de órbita.

En total el satélite cuenta con varios tipos de actuadores, por ejemplo, tiene 12 propulsores bipropelentes (LPS), dos discos de giro ajustables (plataforma) para los momentos (WMA –momentum wheel assemblies), 4 propulsores eléctricos y 2 mecanismos de giro en los paneles solares (SWD – solare wing drive).



En la figura 3.22 están los discos y su respectiva plataforma que le da más movilidad hacia los lados

### 3.1.6 Subsistema de Propulsión

Provee los incrementos de velocidad e impulsos para la transferencia de la órbita y las operaciones de corrección.

El subsistema de propulsión o de control opera según el principio enunciado en la tercera ley de Newton, mediante la expulsión de materia a gran velocidad y alta temperatura a través de toberas o conductos de escape, se obtienen fuerzas de empuje en sentido contrario. Hay propulsores químicos (monopropelentes y bipropelentes) y eléctricos, pero los primeros aún son los de mayor uso porque proporcionan niveles de empuje mucho más grandes que los eléctricos.

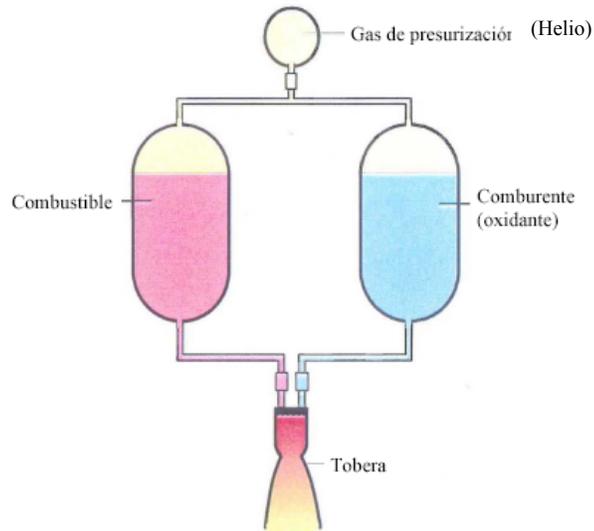
Cada tipo de propelente produce un incremento de velocidad diferente con cierta cantidad de masa consumida; cuanto menor sea la masa necesaria para producir un incremento de velocidad determinado, mayor es el impulso específico del propelente. El impulso específico se puede definir como el empuje producido por cada unidad de peso del propulsante que se consume cada segundo, en consecuencia tiene dimensiones de tiempo y se mide en segundos.



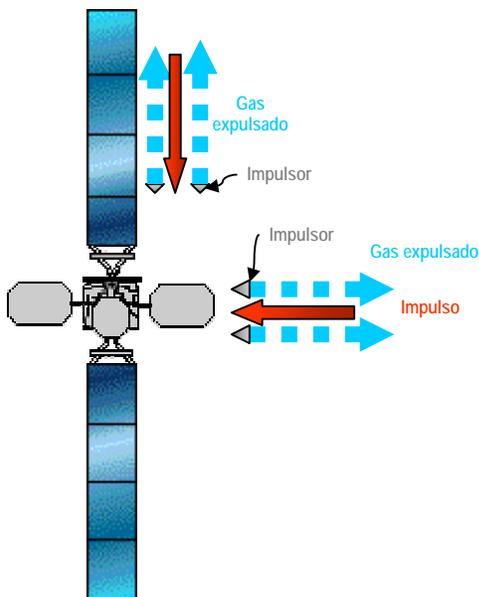
En la figura 3.23 puede verse la posición típica en que se coloca el propulsor LAM o de apogeo.

En la actualidad existe cada vez más la tendencia a utilizar sistemas bipropelentes o bipropulsantes que monopropelentes; con los bipropelentes no se emplea un catalizador, sino que dos propulsores distintos (un combustible y un oxidante) se ponen en contacto. Al unirse las dos sustancias, se produce una combustión instantánea sin necesidad de algún sistema de ignición, de estas sustancias, las más populares son la hidracina monometálica (combustible) y el tetróxido de nitrógeno (oxidante), que al combinarse producen un impulso específico del orden de 300 segundos.

### Bipropelente

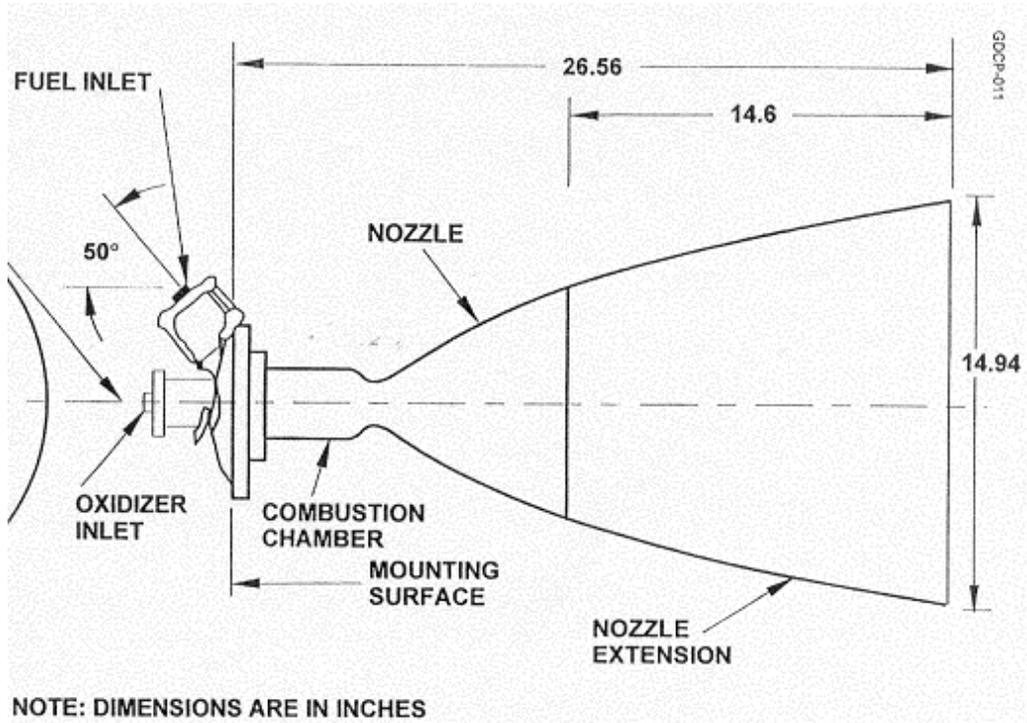


En la imagen 3.24 se muestra el principio básico del funcionamiento bipropelente

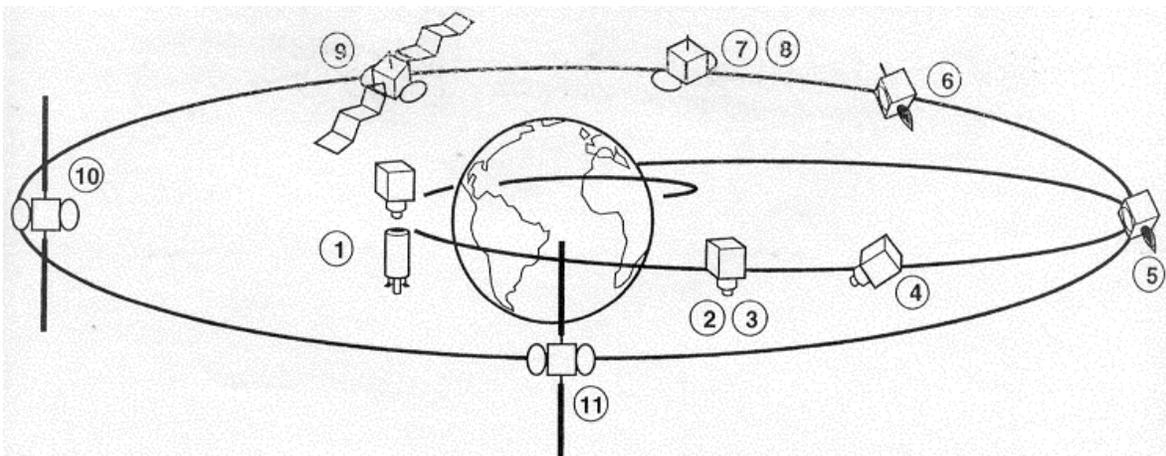


En la imagen 3.25 se observa los sentidos de expulsión e impulso.

El satélite Satmex 5 cuenta con un propulsor llamado de apogeo o LAM el cual tiene un impulso de 490N . Como su nombre lo dice, es el que ayuda al satélite a hacer su cambio de órbita. El impulso específico del propulsor de apogeo es de 314 seg.

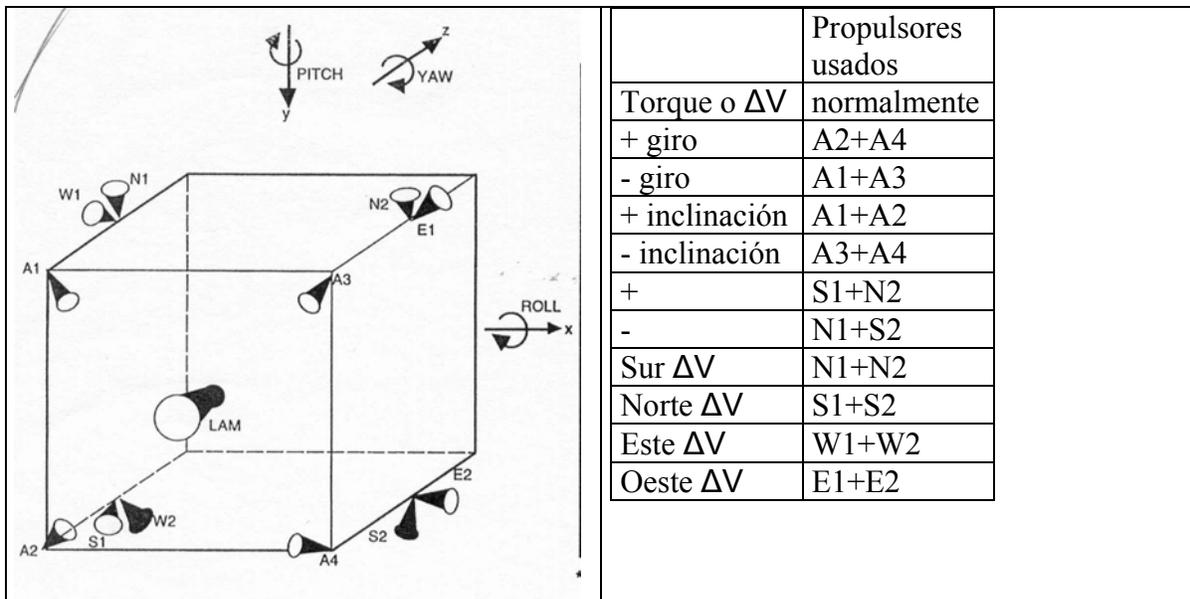


En la figura 3.26 se presentan las características físicas del propulsor LAM Satmex 5



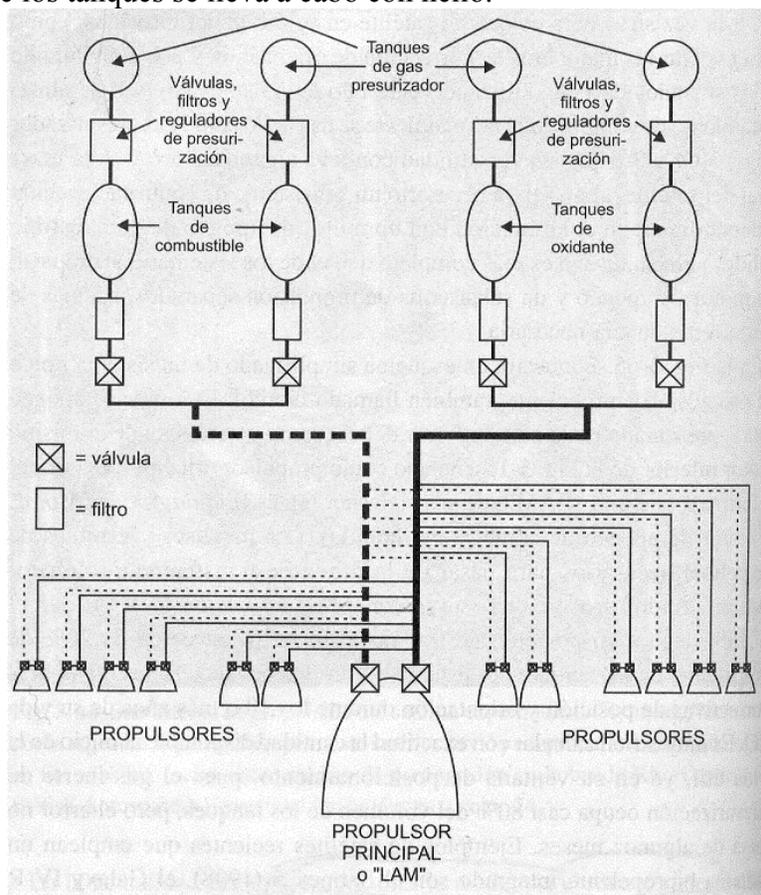
En la figura 3.27 se ve que este propulsor entra en actividad en el punto 5 del proceso de puesta en órbita geostacionaria del satélite

El satélite cuenta además con 8 propulsores de 9.25 N y 4 de 22 N para llevar a cabo las operaciones de estabilización.



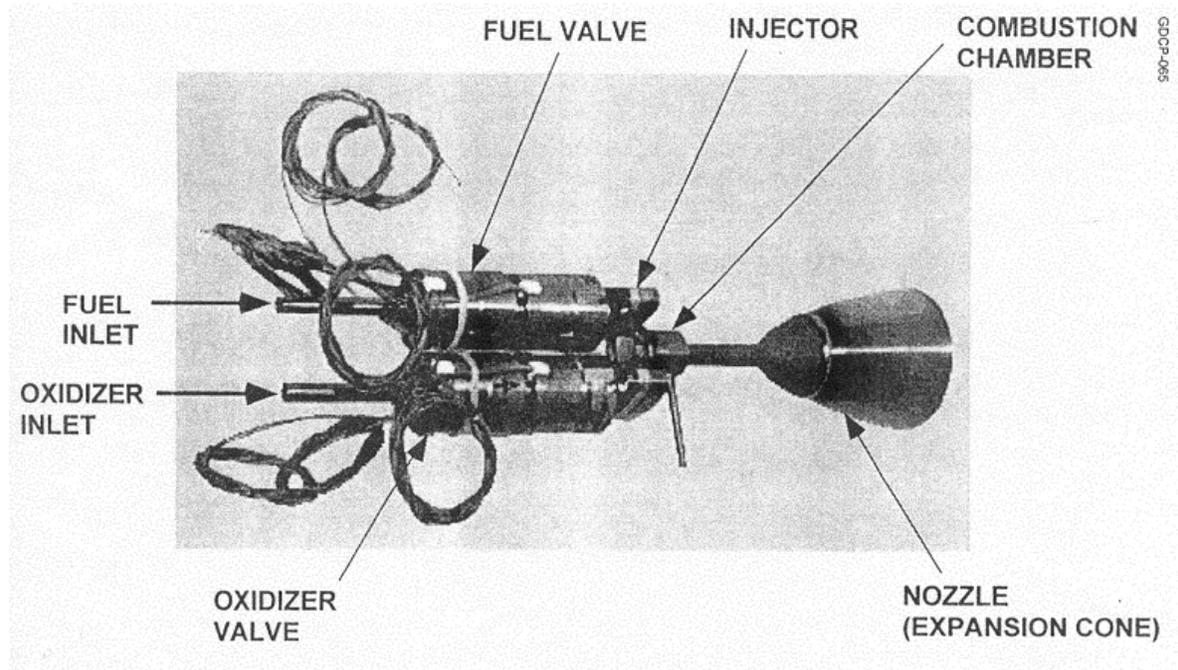
En la figura 3.28 se detalla que papel juega cada propulsor en la estabilización del satélite

Los tanques de almacenamiento contienen un gas que va empujando al combustible hacia las válvulas de alimentación de las cámaras de catalización. Para el caso del Satmex 5 la presurización de los tanques se lleva a cabo con helio.



En la figura 3.29 se ven los 13 propulsores bipropelentes de Satmex 5

El impulso específico de los propulsores de 9.25N es de 28 segundos y de los de 22 N es de 285 segundos. La misiones de estos propulsores son las maniobras de este-oeste, norte y sur, y servir como respaldo del propulsor de apogeo.



En la figura 3.30 se muestra uno de los propulsores de 9.25 N del Satmex 5

El peso de algunas partes de este subsistema se muestran a continuación:

Componente	Número requerido	Masa por unidad Kg	Masa total Kg
Tanques de helio	2	9.54	19.8
Tanques del propelente	4	18.57	74.28
Propulsor de 490N	1	3.86	3.86
Propulsor de 10N	8	.839	6.71
Propulsor de 22N	4	.912	3.65

El peso total del subsistema (tanques vacíos) es de 127.4 Kg.

Cada tanque de helio almacena 55.15 litros.

Los tanques de propelente están hechos de titanium y tienen un diámetro aproximado de 89 centímetros. El volumen contenido por cada uno es de 534.4 litros.

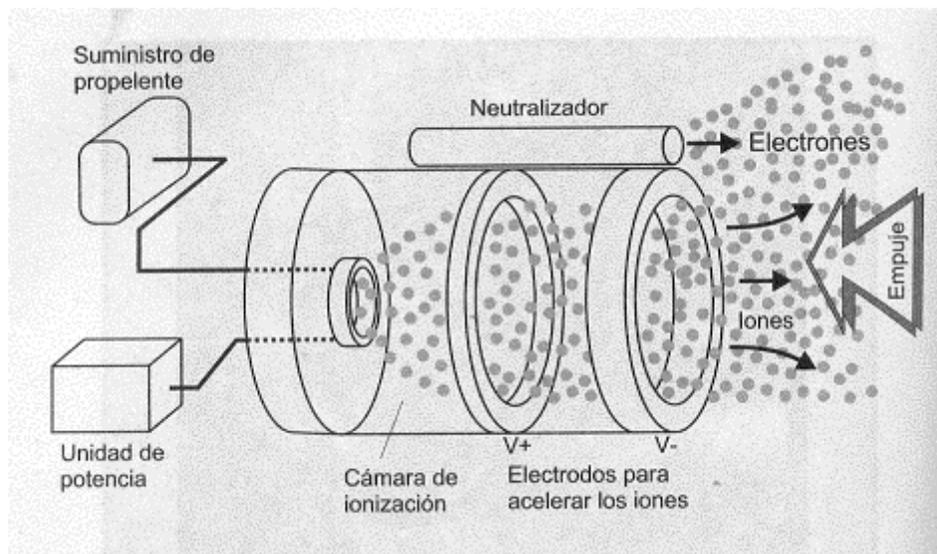
Satmex 5 emplea un sistema bipropelente, además cuenta con propulsores eléctricos a base de iones de xenón para las operaciones primarias de corrección norte-sur; es decir, es un sistema de propulsión combinado. Los desplazamientos norte-sur se deben principalmente a los efectos gravitacionales de la luna y el Sol. Recordemos que los bipropelentes dan la transferencia de la órbita, movimientos este-oeste y los momentos de inclinación.

La llamada propulsión eléctrica hace uso de potencia eléctrica para acelerar algún propelente por medio de un proceso electrostático, electrostático o electromagnético. Su uso se retrasó varios años en gran parte por la falta de suficiente energía eléctrica a bordo de los satélites.

Los propulsores eléctricos involucran el uso de campos electrostáticos o electromagnéticos para acelerar algún material ionizado o plasma. Se caracterizan por empujes bajos ( $<.2N$ ) con altos impulsos específicos (varios miles de segundos) y altos requerimientos de potencia eléctrica; precisamente porque el empuje es bajo.

El HS601HP es un modelo iónico de rejilla (el eléctrico- electrostático) XIPS (xenon ion propulsión system o sistema de propulsión iónica por xenón).

Los propulsores electrostáticos iónicos de rejilla expulsan partículas cargadas eléctricamente a grandes velocidades. Generalmente tienen un diámetro del orden de 15 a 25 cm, según su empuje. El empuje es producido al acelerar los iones positivos a través de una serie de electrodos en forma de rejilla, que están en uno de los extremos de la cámara del propulsor; los electrodos crean más de 3000 haces de empuje sumamente finos, y para evitar que éstos sean atraídos de regreso eléctricamente, por ser del mismo signo, se usa un “neutralizador”, que no es más que un dispositivo externo emisor de electrones. Los iones expulsados salen a unos 30km/s; mientras mayor potencia eléctrica se aplique, los iones se mueven más rápido, y esto resulta en un mayor empuje. Así por ejemplo, el modelo 601 HP XIPS emplea cerca de 500 W de los aproximadamente 10 kW que los arreglos solares del satélite 601HP generan.



En la figura 3.31 se presenta un propulsor eléctrico y sus partes

El satélite cuenta con 4 propulsores de este tipo cuyo principal objetivo son los desplazamientos norte-sur, el control de la excentricidad y los momentos de giro.

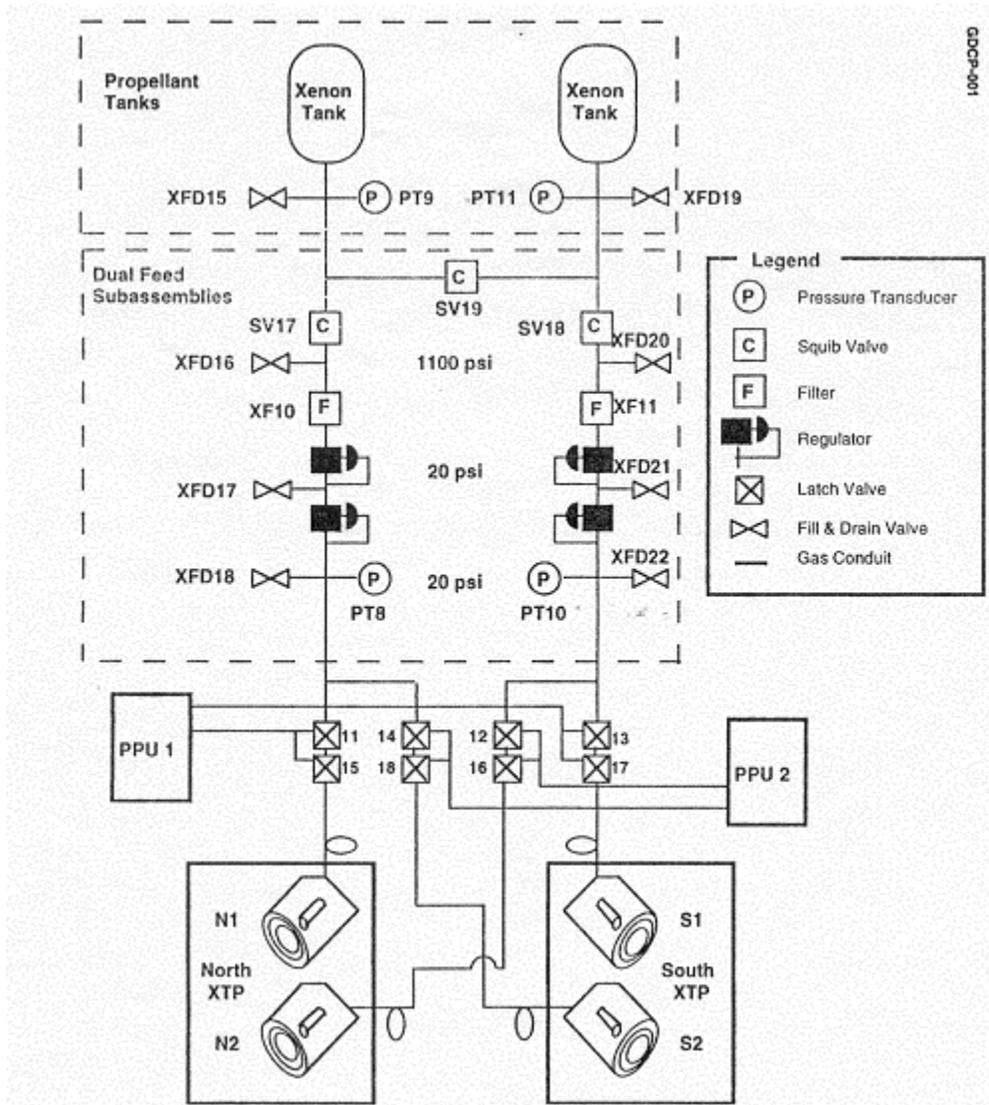
El hecho de que estos propulsores empleen xenón no es arbitrario; la empresa determinó después de una serie de investigaciones que, dentro de todos los gases inertes no-reactivos,

éste ofrecía el mayor empuje y que además, siendo inerte, no presenta riesgo de corrosión o explosión para el satélite, y tampoco para el personal de tierra cuando los tanques de propelente están siendo llenados.

Propulsor	Empuje (mN)	Impulso específico (s)	Potencia requerida
HS 601 HP XIPS (diámetro 13 cm)	18.2	2,560	500W

En el HP XIPS tiene que trabajar hasta 5 horas por día.

Los tanques de almacenamiento son fabricados con acero inoxidable o titanio;



En la figura 3.32 se muestran las partes necesarias para los propulsores eléctricos.

Cuenta con dos tanques de almacenamiento, cada tanque es capaz de almacenar 32.12 litros.

El empuje de cada propulsor es de 18.2 mN. El impulso específico es de 2555 segundos.

El peso total de la parte de propulsión eléctrica (tanques vacíos) es de 105 Kg.

El combustible que contenían los tanques del Satmex 5 el 1º de enero de 1999 era: bipropelente 106.761 Kg, y de Xenon, 229.443 Kg.

Es necesario guardar un poco de combustible al final de la vida útil para impulsar al satélite a una órbita más alta, hacia su cementerio.

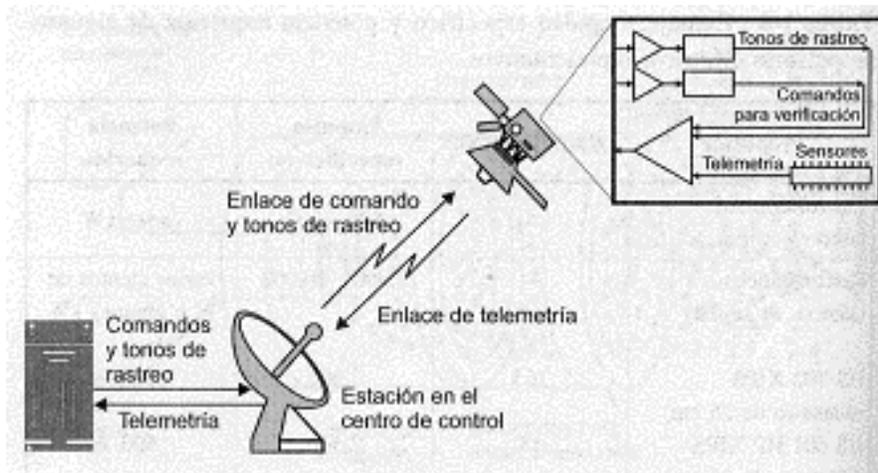
### 3.1.7 Subsistema de Rastreo, Telemetría y Comando

Le permite al satélite comunicarse con el centro de operaciones, enviando información sobre el estado de los equipos, recibiendo instrucciones para configurarse según las necesidades de la nave o de los usuarios, así como permitir la determinación de su órbita.

Este subsistema permite conocer a control remoto la operación y posición del satélite, así como enviarle órdenes para que algún cambio deseable se ejecute. El equipo de telemetría cuenta con diversos tipos de sensores instalados en varios cientos de puntos de prueba, que miden cantidades tales como voltajes, corrientes, presiones, potencia de salida de amplificadores, posición de interruptores y temperaturas, etc. Las lecturas tomadas por los sensores son convertidas en una señal digital que el satélite transmite hacia la Tierra con una velocidad baja, entre 200 y 1000 bits por segundo, y esta información permite conocer el estado de operación del sistema, apoyada por la información de rastreo. El rastreo se efectúa mediante la transmisión de varias señales piloto, denominadas tonos, desde la estación terrestre de control hacia el satélite.

Las señales de comando son las que permiten efectuar las correcciones en la operación y funcionamiento del satélite a control remoto, como cambiar la ganancia de los amplificadores, cerrar algún interruptor, conmutar de transpondedor, modificar la orientación de la estructura, extender los paneles solares o mover las antenas.

El rastreo del satélite tiene un error máximo de 30 metros de su posición real.



En la imagen 3.33 se observa el flujo de información de la estación terrena al satélite y viceversa en este subsistema.

En la sección 3.1.1 de este capítulo se habla más acerca de las antenas para este subsistema.

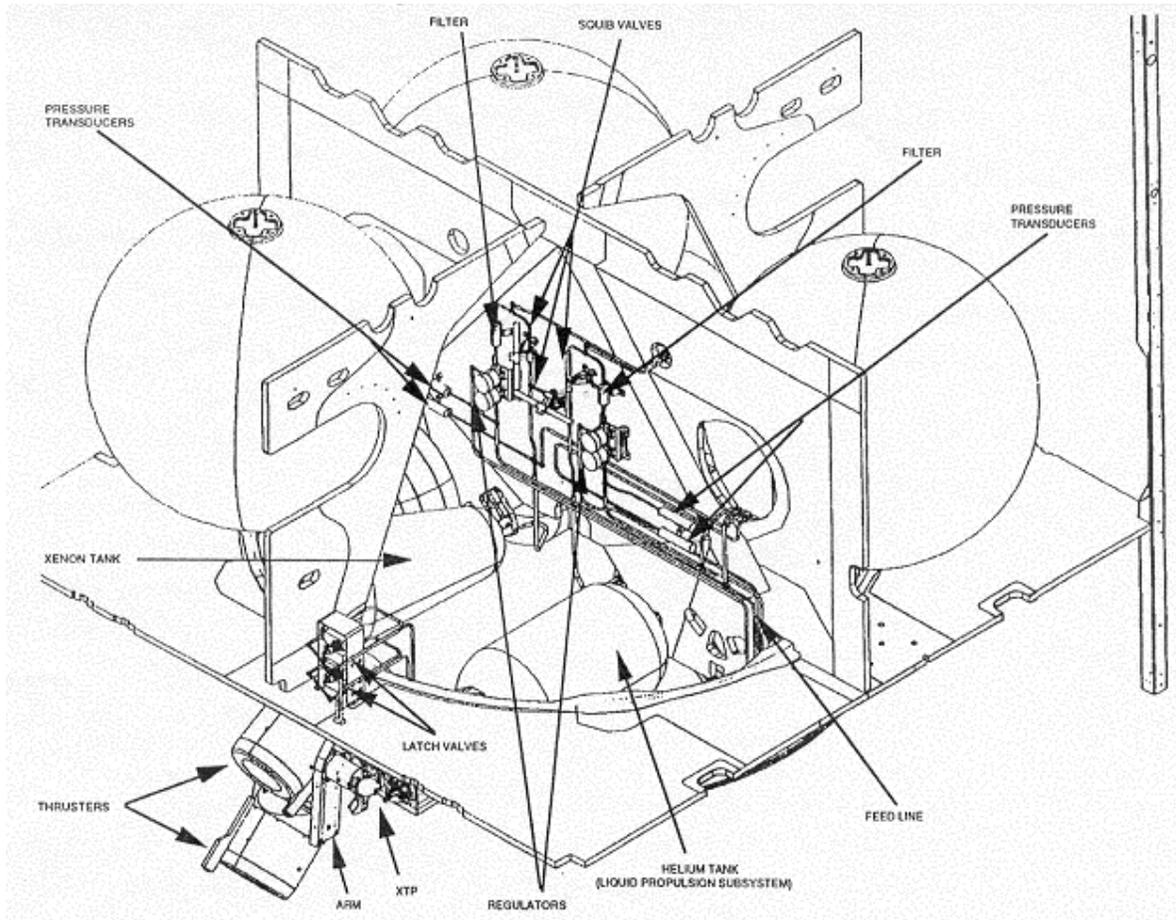
La interfase del subsistema de propulsión y telemetría se da en:

- medir la temperatura en la válvula del oxidante en el propulsor de apogeo y restantes propulsores.

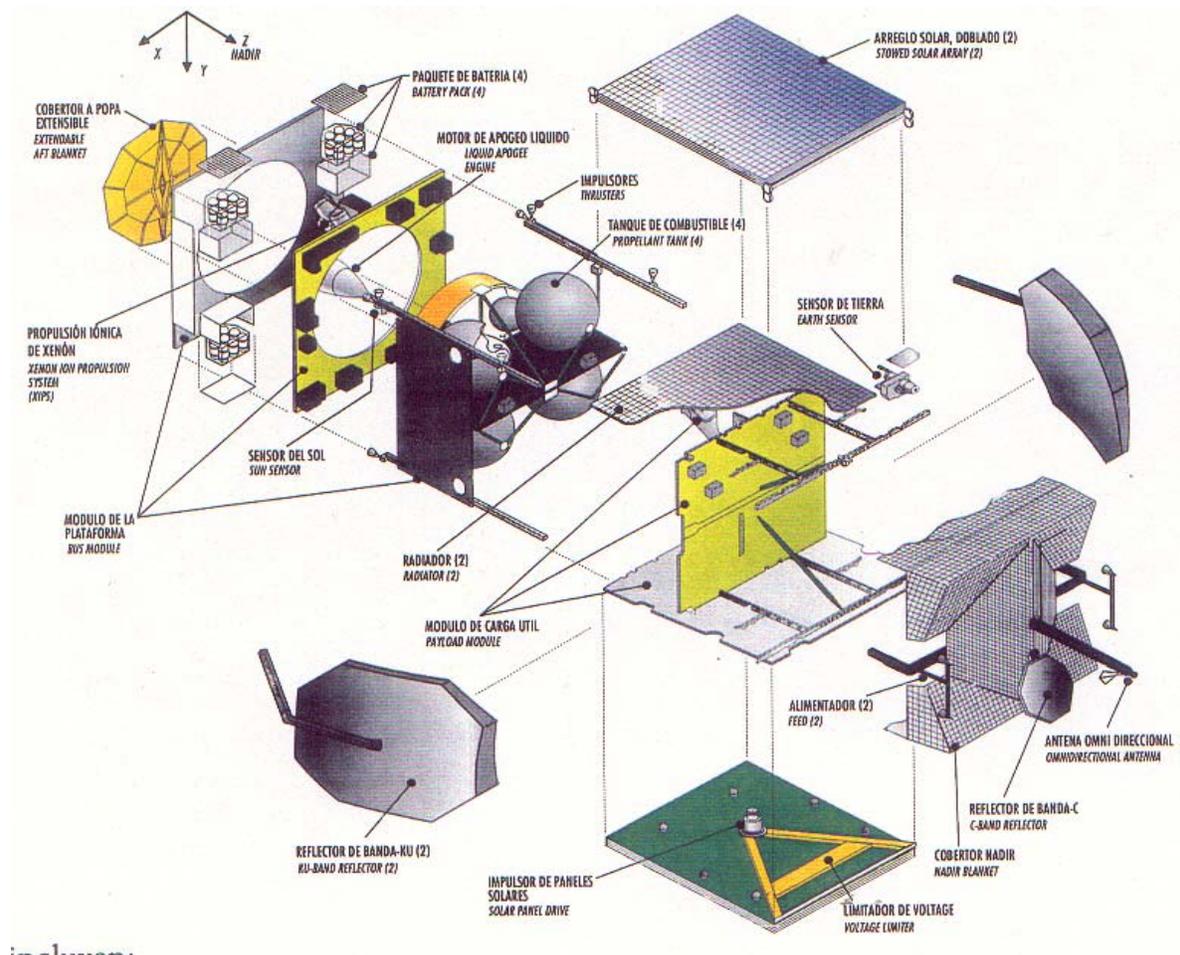
- En la medida de la temperatura de los inyectores
- La medición de la temperatura en los tanques del propelente y el presurizador.

En lo referente al comando maneja las válvulas en los tanques.





En la figura 3.35 se observan presurizadores, filtros, válvulas, tanques de helio, tanques de xenón, propulsores eléctricos, tanques del sistema bipropelente.



En la imagen 3.36 se observa la mayor parte de los elementos que conforman el satélite.

## CAPITULO 4

### 4.1 Subsistemas de Satmex 6

Satmex 6 estará en órbita aproximadamente para el segundo trimestre del 2004. Se esperaba que estuviese en funcionamiento desde el 2003, sin embargo, diversas circunstancias de carácter técnico y financiero ocasionaron que se retrasara el plan de ponerlo en órbita para el 2003. El satélite actualmente se encuentra en fase de pruebas por parte de la empresa Space Systems Loral en Palo Alto, California, y al terminar finalmente será lanzado.

Para la puesta en órbita geostacionaria del Satmex 6 se eligió al lanzador Ariane Space, que lo ubicará en la posición orbital 113.0°O partiendo desde su base en Kourou, Guayana Francesa en un cohete Ariane 5G.

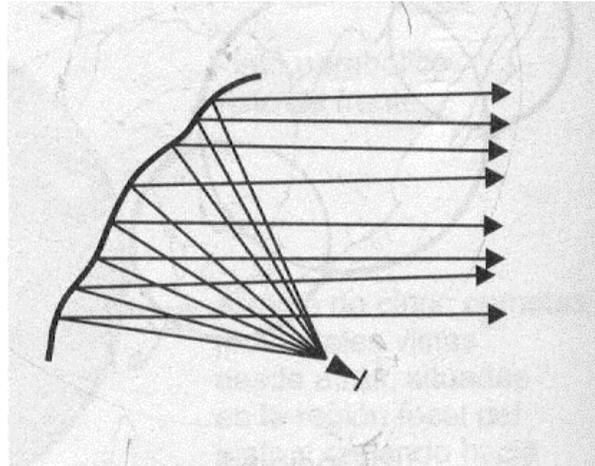
Para la construcción del Satmex 6 se eligió al fabricante Space Systems Loral y fue especificado por personal técnico de Satmex para satisfacer requerimientos de frecuencias, cobertura, potencia, propulsión, y otros aspectos de ingeniería que ningún otro satélite presenta. Space Systems Loral ha construido más de 200 naves espaciales.

Satmex 6 es el primer satélite comercial mexicano con cobertura continental diseñado para dar servicio a todo el continente americano; Satmex 6 es más poderoso que el Satmex 5 y se convertirá en el satélite comercial más grande de América Latina. Transmitirá señales de empresas de telefonía, televisoras, proveedoras de acceso a Internet, redes corporativas (VSAT) entre otras. Podrá conectar a todos los rincones de América con transmisiones de voz, imágenes, datos, servicios de banda ancha, y proporcionará servicios de videoconferencia y otras aplicaciones comerciales; además, contribuirá de forma vital a apoyar proyectos de seguridad nacional y de conectividad rural, como es el caso del programa e-México.

Satmex 6 representa un paso más hacia la modernidad y la globalización que se requiere para desarrollar la economía y fortalecer la sociedad mexicana. Será un elemento esencial para que las telecomunicaciones de México estén a la altura de las mejores del mundo, permitiendo un aprovechamiento pleno de los avances tecnológicos en materia de computación, Internet y conectividad, contribuyendo así al desarrollo y al bienestar de sus comunidades, para que los mexicanos tengamos un país que nos brinde más oportunidades de superación personal y profesional.

**4.1.1 Subsistema de Antenas**

Entre las antenas más avanzadas están los platos parabólicos con superficie perfilada (también llamadas irregulares o conformadas). Este tipo de antenas produce huellas de tipo irregular, con ahorro de peso y costos de lanzamiento. Una sola corneta (para una cada polarización) ilumina al plato parabólico imperfecto, es decir, con superficie perfilada. No solo se reduce el costo y el peso total del sistema de antenas, sino que además se evitan las pérdidas de potencia asociadas con el sistema tradicional de alimentación.



En la figura 4.1 se muestra el perfil de una antena de superficie perfilada y su alimentador.

Estos reflectores son diseñados por medio de un procedimiento matemático iterativo, para calcular las perturbaciones superficiales. Estas perturbaciones pueden ser hendiduras o crestas que proporcionan los desfases necesarios y pueden tener profundidad o altura cerca de uno o dos centímetros, la dimensión exacta depende de la frecuencia de trabajo.

El ahorro en el costo con la reducción de peso es de aproximadamente 10 millones de dólares y la masa de la antena se reduce aproximadamente unos 100 kilogramos

Satmex 6 cuenta con 4 reflectores para la banda C , cada uno con dimensiones de 1.8 x 2.2 metros, y 2 para la banda Ku , con dimensiones de 2.2 x 2.8 metros

Para ambas bandas emplea polarización lineal, cornetas corrugadas para la banda C y cornetas piramidales para la banda Ku.

Cuenta además con 5 antenas para la telemetría y comando:

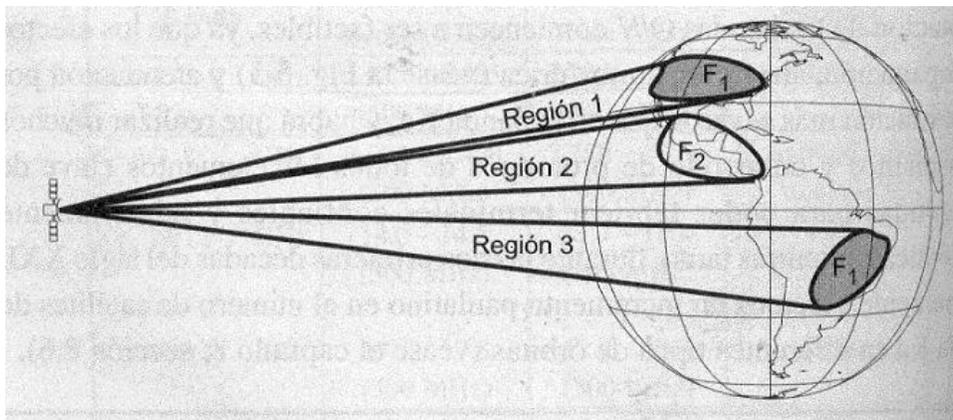
Antenas para telemetría y comando	2 wide beam ( 1 con polarización circular izquierda y 1 derecha.) 2 narrow beam ( 1 con polarización circular izquierda y otra derecha). 1 plato parabólico de polarización lineal vertical.
-----------------------------------	--

### 4.1.2 Subsistema de Comunicaciones

Al contratar espacio satelital en Satmex 6 los usuarios obtendrán: alta potencia en Banda C y Ku, reducción del tamaño de las antenas, cobertura continental, cobertura configurable (capacidad del satélite para cambiar su área de servicio) y tecnología probada en vuelo ideal para aplicaciones por cable y de Internet por el PIRE con el que cubre la región.

Posee 60 transpondedores de 36 MHz cada uno: 36 canales en banda C que darán servicio en tres regiones (Estados Unidos, Sudamérica y Continental), y 24 canales en banda Ku con cobertura NAFTA (North American Free Trade Agreement) y Continental, (además pueden interconectarse las huellas CONUS y Sudamérica) con un haz de alta potencia sobre las principales ciudades en Sudamérica (incluyendo Brasil). Satmex 6 contará con 60 emisores-receptores automáticos de identificación de 36 MHz cada uno.

Satmex 6 emplea reutilización de frecuencia con aislamiento espacial (banda C) y reutilización de frecuencia por discriminación de polarización (en ambas bandas). La reutilización por discriminación de polarización se explicó en el capítulo anterior. El reuso de frecuencia por aislamiento espacial consiste en que la antena produce haces dirigidos hacia zonas geográficas diferentes, las huellas de iluminación que están lo suficientemente separadas pueden emplear las mismas frecuencias. Para evitar posibles interferencias en el satélite, se ajusta un valor de umbral de recepción que elimina la poca señal que el receptor percibe de la otra zona geográfica.



En la figura 4.2 se ejemplifica la reutilización de frecuencia, la región 1 y 3 emplean la misma frecuencia sin tener problemas de interferencia.

En la siguiente tabla se presentan algunas de las características del subsistema de comunicaciones para Satmex 6.

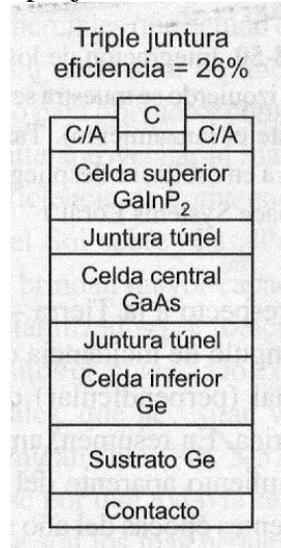
Las huellas de PIRE para Satmex 6 se muestran más adelante en el siguiente capítulo (anexo 5.1.5)

	C1 CONUS + Hawaii	C2 Sudamérica	C3 Continental	Ku-1 Estados Unidos y México	Ku-2 Continental y+ haz regional en Sudamérica
Cobertura C					
PIRE a la orilla de la cobertura	40 dBW	39 dBW	38 dBW	49 dBW	Continental: 46 dBW Sudamérica: 49 dBW Brasil: 46dBW
Número de transpondedores	12	12	12	12 fijos + 6 conmutables	6 fijos + 6 conmutables
G/T a la orilla de la cobertura	0.0 dB/K	-1.5 dB/K	-3.0 dB/K	+1.5 dB/K	Continental: -3.5 dB/K Sudamérica: -0.5 dB/K Brasil: -3.5dB/K
Redundancia de los transpondedores (y TWTA´s)	16:12	16:12	16:12	16:12	16:12
Redundancia de los receptores	10/6			6/4	
Potencia (nominal)	42 W	33 W	47 W	150 W	250 W

Para la telemetría se emplean las frecuencias de 4198.875 y 4199.5 MHz; para el comando 5926 MHz.

### 4.1.3 Subsistema de Energía Eléctrica

Satmex 6 será capaz de generar una potencia promedio de 12.2 kW al inicio de su vida útil, aunque como valor máximo puede proporcionar 13.5 kW. Sus celdas solares han sido creadas con arseniuro de galio de triple juntura.



En la figura 4.3 se muestra la estructura de la celda de triple juntura que ocupa el Satmex 6

Cuenta con 4 paneles en cada una de sus dos alas y en cada ala también posee 20 circuitos. Sus células tienen como características principales su eficiencia del 26 %, tamaño de 30 x 30 centímetros y cada una produce una potencia mínima de 35.9 mW/cm<sup>2</sup>. El espesor es de 175 μm.

La corriente regulada con la que los subsistemas se alimentan consta de 100 V, y en los momentos en los que se requieren las 2 baterías son capaces de producir 11.49 kW. Dichas baterías consta cada una de 40 células y están hechas de NiH<sub>2</sub>.

### 4.1.4 Subsistema de Control Térmico

Este subsistema es muy similar en todos los satélites, de hecho, emplea los mismos métodos que Satmex 5 y no es necesario repetir cada uno de ellos.

En particular, dos temperaturas son de suma importancia, la temperatura mínima de su propelente es de 10°C, y de 40°C para sus propulsores. Como este par de temperaturas son límite, el satélite cuenta con varias mediciones propias que le permitan tener el control térmico del satélite en distintos puntos.

#### 4.1.5 Subsistema de Posicionamiento y Orientación

Originalmente Satmex 6 iba a ser colocado en la posición orbital 109.2 grados oeste, sin embargo posteriormente Satmex decidió colocarlo en la posición 113 grados oeste.

Cuenta con 8 sensores solares y 3 discos inerciales o de momento. La utilidad de cada uno de éstos se explicó en el capítulo anterior. Cuenta también con diversos propulsores que se mencionan un poco más adelante.

Al igual que el resto de los satélites tiene un límite de deriva:

Tolerancia de deriva (station keeping)	+ 0.05° N-S + 0.05° E-W
---	-------------------------

#### 4.1.6 Subsistema de Propulsión

Su sistema de propulsión es únicamente bipropelente.

El satélite tiene una vida útil de 15 años por lo que se espera que siga en función hasta el año 2019 o más tiempo, todo depende de la manera en que se racionalice el propelente, ya que puede llegar a tener una vida útil de 18 años o más.

No tiene propulsión eléctrica ya que el fabricante no tiene completamente desarrollada esta tecnología, por lo que Satmex decidió que no se incluyera en su nuevo modelo.

Emplea hidracina monometílica como combustible, el tetróxido de nitrógeno como oxidante y helio como gas presurizador.

Posee 13 propulsores bipropelentes. El primero de ellos es el propulsor LAM o de apogeo que brinda al satélite un impulso de 455 N y un impulso específico de 320 segundos. Los 12 propulsores restantes brindan un impulso de 22 N cada uno, y tienen un impulso específico de 293.3 segundos.

#### 4.1.7 Subsistema de Rastreo, Telemetría y Comando

Este subsistema es igual que en el caso de Satmex 5

#### 4.1.8 Subsistema Estructural

Su diseño y construcción están basados en la plataforma geoestacionaria SS/L1300 y se han integrado los últimos avances en nanoelectrónica y comunicación satelital disponible con lo que se busca un desempeño óptimo una vez que se sea puesto en órbita. Su modelo es FS1300. Tiene un tamaño de 31.1 metros de punta a punta. Este satélite pesa 5626 Kg.

## 4.2 Comparación técnica entre Satmex 5 y Satmex 6

CARACTERÍSTICA	Satmex 5	Satmex 6
Año de lanzamiento	1998	2004
Modelo	HS 601 HP	FS 1300X
Fabricante	Hughes (Boeing Aerospace)	Loral Space and Communications
Vida útil (años)	15	15
Lanzador	Ariane 4	Ariane 5
Lugar de lanzamiento	Kourou, Guayana Francesa	Kourou, Guayana Francesa
<b>ANTENAS</b>		
Número de reflectores banda C	1	4
Dimensiones de cada reflector de banda C	1.79 m de diámetro (70 pulgadas)	1.8 x 2.2 m
Número de reflectores banda Ku	2	2
Dimensiones de los reflectores de banda Ku	2.05 x 2.56 m ( 80 x 100 pulgadas)	2.2 x 2.8 m
Tipo de antenas de carga útil	Parabólicas con reflector de rejillas duales y superficie perfilada	Parabólicas con reflector de superficie perfilada
Polarización en la banda C	Lineal	Lineal
Polarización en la banda Ku	Lineal	Lineal
Tipo de alimentador en la banda C	Corneta piramidal	Corneta corrugada
Tipo de alimentador en la banda Ku	Corneta corrugada	Corneta piramidal
PIRE en los bordes de cobertura dBW	C: 38 Ku 1: 49.0 Ku 2: 46.0	C1: 40 C2: 39 C3: 38 Ku1: 49 Ku2: 46 y 49
G/T en los bordes de cobertura dB/°K	C: -4.2 Ku 1: 1.85 Ku 2: -1.9	C1: 0 C2: -1.5 C2: -3 Ku1: +1.5 Ku2: -3.5 y -5
Huellas de cobertura	*Consultar imágenes	*Consultar imágenes
Número de antenas para telemetría y comando	3	5
Tipo de antenas para telemetría y comando	1 bicónica omnidireccional con polarización lineal. 2 de pipa o tubo con polarización circular.	2 wide beam ( 1 con polarización circular izquierda y 1 derecha.) 2 narrow beam ( 1 con polarización circular

		izquierda y otra derecha). 1 plato parabólico de polarización lineal vertical.
<b>COMUNICACIONES</b>		
No. de transpondedores activos y potencia c/u Banda C	(48 en total) 24 de 36 W	(60 en total) C1: 12 de 42 W C2: 12 de 33 W C3: 12 de 47 W
Banda Ku	Ku1: 12 de 75.6 W Ku2: 12 de 132.5 W	Ku1: 12 de 150 W Ku2: 12 de 250 W
Ancho de banda de los transpondedores Banda C	Todos de 36 MHz	Todos de 36 MHz
Banda Ku	Todos de 36 MHz	Todos de 36 MHz
Redundancia de receptores	C: 4/2 Ku: 6/4	C: 10/6 Ku: 6/4
Redundancia TWT's	C: 32/24 Ku1: 16/12 Ku2: 16/12	C1: 16/12 C2: 16/12 C3: 16/12 K1: 16/12 K2: 16/12
Frecuencias empleada para telemetría	Entre 4199.125 MHz y 4199.625 MHz	4198.875 MHz y 4199.500 Mhz
Frecuencias empleada para comando	5930 MHz y 6424 MHz	5926 MHz
<b>ENERGÍA ELÉCTRICA</b>		
Potencia promedio (kW)	8	12.2
Tipo de celda solar	Arseniuro de Galio (GaAs Doble Juntura)	Arseniuro de Galio (GaAs triple Juntura)
Número de paneles por ala	4	4
Número de circuitos por ala	64	20
Eficiencia % de la celda solar	21.6	26
Tamaño de la celda solar (cm)	30	30
Potencia mínima (mW/cm <sup>2</sup> )	29.1	35.9
Espesor de celda (µm)	175	175
Potencia máxima que generan las celdas solares kW al inicio de su vida útil	10.1	13.5
Corriente regulada (V)	52	100
Baterías	32 celulas de NiH <sub>2</sub>	80 células ( 2 baterías de 40 c/u) de NiH <sub>2</sub>

Energía máxima que producen las baterías (W)	8,323	11,490
<b>CONTROL TÉRMICO</b>		
Temperatura mínima del propelente [°C]	10	10
Temperatura mínima de los propulsores [°C]	41	40
<b>POSICIONAMIENTO Y ORIENTACIÓN</b>		
Posición orbital	116.8° O	113° O
Número de sensores solares	4	8
Número de discos de momento y plataforma (WMA)	2	3
Propulsores	*(consultar esta sección)	*(consultar esta sección)
<b>PROPULSIÓN</b>		
Cuenta Propulsión bipropelente	Si	Si
Número de propulsores de apogeo o LAM	1	1
Características del propulsor LAM	Impulso de 490 N e impulso específico de 314 seg.	Impulso de 455 N e impulso específico de 320 seg.
Número de propulsores bipropelentes para orientación	12	12
Características de los propulsores bipropelentes para orientación.	8 con impulso de 10 N e impulso específico de 285 seg. 4 con impulso de 22 N e impulso específico de 285 seg	12 con impulso de 22 N e impulso específico de 293.3 seg.
Combustible empleado	Hidracina monometilica	Hidracina monometilica
Oxidante empleado	tetróxido de nitrógeno	tetróxido de nitrógeno
Gas presurizador	Helio	Helio
Cuenta Propulsión eléctrica (iones Xenón)	Si	No
Número de propulsores eléctricos	4	0
Características de los propulsores eléctricos para orientación.	4 con impulso de 18 mN e impulso específico de 2560 seg.	0
<b>ESTRUCTURAL</b>		
Peso en el lanzamiento	4.1 T	5.626 T
Extensión máxima (desde cada punta de las alas)	26.2 m	31.1 m

CARACTERÍSTICA	Satmex 5	Satmex 6
Año de lanzamiento	1998	2004
Modelo	HS 601 HP	FS 1300X
Fabricante	Hughes (Boeing Aerospace)	Loral Space and Communications
Vida útil (años)	15	15
Lanzador	Ariane 4	Ariane 5
Lugar de lanzamiento		Kourou, Guayana Francesa

La primer gran diferencia es el fabricante que los construyó. Todos los satélites mexicanos habían sido contruidos por Hughes (ahora Boeing Aerospace), sin embargo, la decisión de Satmex para este último y más nuevo satélite se inclinó por Loral Space and Communications, actual propietario del 49 % de las acciones de la empresa. Cabe señalar que ambas empresas han desarrollado su propia tecnología, en todos los sentidos; por ello veremos diferencias que, mas que ser una ventaja o desventaja, son tan solo cambios e implementaciones que cada fabricante ha ido desarrollando.

El satélite HS 601 HP es uno de los satélites más modernos de Hughes, sin embargo no es el más poderoso de esta empresa; un caso similar es el FS 1300X, de Loral, pero Satmex consideró que las necesidades de los usuarios pueden ser cubiertas con este par de satélites y con el Solidaridad 2, que dentro de pronto conformarán una flota más grande. La vida útil reportada para ambos satélites es de 15 años, sin embargo el fabricante de Satmex 6 predice que puede llegar a tener una vida útil de 18 años si su combustible se administra de manera correcta. Los cohetes lanzadores han sido diferentes debido a la evolución y seguridad de los mismos, sin embargo, no tiene mayor importancia este hecho para nuestro objetivo.

ANTENAS		
Número de reflectores banda C	1	4
Dimensiones de cada reflector de banda C	1.79 m de diámetro (70 pulgadas)	1.8 x 2.2 m
Número de reflectores banda Ku	2	2
Dimensiones de los reflectores de banda Ku	2.05 x 2.56 m ( 80 x 100 pulgadas)	2.2 x 2.8 m
Tipo de antenas de carga útil	Parabólicas con reflector de rejillas duales y superficie perfilada	Parabólicas con reflector de superficie perfilada
Polarización en la banda C	Lineal	Lineal
Polarización en la banda Ku	Lineal	Lineal
Tipo de alimentador en la banda C	Corneta piramidal	Corneta corrugada

Tipo de alimentador en la banda Ku	Corneta corrugada	Corneta piramidal
PIRE en los bordes de cobertura dBW	C: 38 Ku 1: 49.0 Ku 2: 46.0	C1: 40 C2: 39 C3: 38 Ku1: 49 Ku2: 46 y 49
G/T en los bordes de cobertura dB/°K	C: -4.2 Ku1: 1.85 Ku 2: -1.9	C1: 0 C2: -1.5 C2: -3 Ku1: +1.5 Ku2: -3.5 y -.5
Huellas de cobertura	*Consultar imágenes	*Consultar imágenes
Número de antenas para telemetría y comando	3	5
Tipo de antenas para telemetría y comando	1 bicónica omnidireccional con polarización lineal. 2 de pipa o tubo con polarización circular.	2 wide beam ( 1 con polarización circular izquierda y 1 derecha.) 2 narrow beam ( 1 con polarización circular izquierda y otra derecha). 1 plato parabólico de polarización lineal vertical.

El número de reflectores en banda Ku es el mismo, sin embargo no es así en la banda C, Satmex 5 solo posee uno, y Satmex 6 tiene 4 reflectores.

Vemos que el tamaño de las antenas del Satmex 6 son más grandes, estos es, en principio de cuentas y como se verá más adelante, Satmex 6 es más grande físicamente que Satmex 5, además, la forma de las antenas da una optimización de espacio y también aunque en menor medida, brinda protección al momento del lanzamiento. Recordemos además que su ganancia está en función de las dimensiones físicas de la antena, y se puede apreciar que el PIRE para Satmex 6 es mayor.

Ambos satélites han desarrollado la tecnología de superficie perfilada o conformada, ya que como se mencionó con anterioridad reduce peso y minimiza costos.

La polarización es lineal en las utilidades de radiocomunicaciones, ya que este tipo de polarización es más eficiente para estos fines. Los alimentadores son diferentes, y esto es parte del modelo y de las propuestas mismas de cómo el fabricante ha desarrollado su tecnología.

La cobertura de Satmex 6 es mayor, para ello basta ver las huellas de ambos satélites en donde se aprecia que Satmex 6 brinda servicio a extensiones de territorio más grandes. Además el PIRE que irradia este satélite es mayor debido a que es más potente

Satmex 6 cuenta con un número mayor de antenas para telemetría y comando, y esto puede estar relacionado con las especificaciones del fabricante, ya que los puntos de telemetría son decididos por la importancia y cantidad de datos que se requieren medir en el satélite y la cantidad de información que se desea proporcionar a la Tierra de los mismos.

COMUNICACIONES		
No. de transpondedores activos y potencia c/u Banda C	(48 en total) 24 de 36 W	(60 en total) C1: 12 de 42 W C2: 12 de 33 W C3: 12 de 47 W
Banda Ku	Ku1: 12 de 75.6 W Ku2: 12 de 132.5 W	Ku1: 12 de 150 W Ku2: 12 de 250 W
Ancho de banda de los transpondedores Banda C	Todos de 36 MHz	Todos de 36 MHz
Banda Ku	Todos de 36 MHz	Todos de 36 MHz
Redundancia de receptores	C: 4/2 Ku: 6/4	C: 10/6 Ku: 6/4
Redundancia TWT's	C: 32/24 Ku1: 16/12 Ku2: 16/12	C1: 16/12 C2: 16/12 C3: 16/12 K1: 16/12 K2: 16/12
Frecuencias empleada para telemetría	Entre 4199.125 MHz y 4199.625 MHz	4198.875 MHz y 4199.500 Mhz
Frecuencias empleada para comando	5930 MHz y 6424 MHz	5926 MHz

Satmex 6 cuenta con 12 transpondedores más en banda C, esto es gracias a la reutilización de frecuencia por aislamiento espacial que utiliza entre la banda C1 y C3. Esto se ve reflejado en todos los elementos no comunes que constituyen cada transpondedor (TWT's). La potencia de casi todos los transpondedores es mayor en Satmex 6. El ancho de banda de cada satélite en cada transpondedor es la misma.

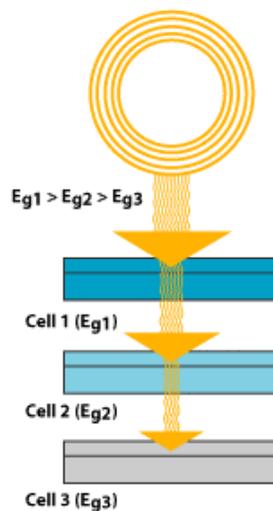
Como se explicó anteriormente, antes de que cada señal pase a su transpondedor correspondiente, pasan por una etapa común de recepción. Satmex 6 tiene mayor cantidad de estos módulos receptores en la banda C y además la redundancia de los mismos es mayor.

Ambos satélites tienen su frecuencia asignada para la transmisión de telemetría y comando hacia la estación terrena de control.

ENERGÍA ELÉCTRICA		
Potencia promedio (kW)	8	12.2
Tipo de celda solar	Arseniuro de Galio (GaAs Doble Juntura)	Arseniuro de Galio (GaAs Triple Juntura)
Número de paneles por ala	4	4
Número de circuitos por ala	64	20
Eficiencia % de la celda solar	21.6	26
Tamaño de la celda solar (cm)	30	30
Potencia mínima (mW/cm <sup>2</sup> )	29.1	35.9
Espesor de celda (µm)	175	175
Potencia máxima que generan las celdas solares kW al inicio de su vida útil	10.1	13.5
Corriente regulada (V)	52	100
Baterías	32 células de NiH <sub>2</sub>	80 células ( 2 baterías de 40 c/u) de NiH <sub>2</sub>
Energía máxima que producen las baterías (W)	8,323	11,490

Otra de las grandes diferencias entre los satélites es la potencia producida por sus celdas solares, en donde Satmex 6 produce mayor cantidad de potencia que la producida por el Satmex 5, gracias a la mejor eficiencia de las mismas.

Satmex 5 cuenta con celdas de Arseniuro de Galio de doble juntura y Satmex 6 de triple juntura, la diferencia radica en que un dispositivo multijuntura es un conjunto de celdas individuales de una sola juntura, colocadas en orden descendente de acuerdo a su espacio de banda. La celda más alta captura los fotones de alta energía y deja pasar el resto de los fotones hacia abajo para ser absorbidos por las celdas con espacios de bandas más bajos.



En la figura 4.4 se ve la energía absorbida por cada juntura.

Los dispositivos multijuntura de más niveles pueden lograr una mayor eficiencia de conversión total porque pueden convertir una fracción más grande del espectro luminoso en electricidad.

Eso hace que la eficiencia de las celdas de Satmex 6 sea mayor y éste pueda ser capaz de producir más potencia eléctrica.

El número de baterías es mayor en Satmex 6, sin embargo, esto no tiene mucha importancia, es decir, ambos arreglos de baterías deben de ser capaces de producir suficiente potencia en los momentos requeridos. Es entendible que sean más baterías en el Satmex 6 ya que la potencia que deben generar es mayor.

CONTROL TÉRMICO		
Temperatura mínima del propelente [°C]	10	10
Temperatura mínima de los propulsores [°C]	41	40

El control de la temperatura se lleva a cabo en varios puntos del satélite, depende mucho de el diseño original, se tomaron solo 2 puntos en donde el control de la temperatura es vital y se aprecia que son valores similares.

POSICIONAMIENTO Y ORIENTACIÓN		
Posición orbital	116.8° O	113° O
Número de sensores solares	4	8
Número de discos de momento y plataforma (WMA)	2	3
Propulsores	*(consultar esta sección)	*(consultar esta sección)

El número de sensores de Sol es del doble en Satmex 6, sin embargo, para poder hacer una comparación se requerirían características más específicas de su funcionamiento. En cuanto al número de discos de momentos, el número es mayor en Satmex 6, sin embargo, Satmex 5 compensa esta diferencia con plataformas que permite a los discos un movimiento hacia los lados para poder sustituir ese disco faltante.

PROPULSIÓN		
Cuenta Propulsión bipropelente	Si	Si
Número de propulsores de apogeo o LAM	1	1
Características del propulsor LAM	Impulso de 490 N e impulso específico de 314 seg.	Impulso de 455 N e impulso específico de 320 seg.

Número de propulsores bipropelentes para orientación	12	12
Características de los propulsores bipropelentes para orientación.	8 con impulso de 10 N e impulso específico de 285 seg. 4 con impulso de 22 N e impulso específico de 285 seg	12 con impulso de 22 N e impulso específico de 293.3 seg.
Combustible empleado	Hidracina monometílica	Hidracina monometílica
Oxidante empleado	Tetróxido de nitrógeno	Tetróxido de nitrógeno
Gas presurizador	Helio	Helio
Cuenta Propulsión eléctrica (iones Xenón)	Si	No
Número de propulsores eléctricos	4	0
Características de los propulsores eléctricos para orientación.	4 con impulso de 18 mN e impulso específico de 2560 seg.	0

Ambos satélites cuentan con propulsión bipropelente, ya que ésta es la más probada y segura para ambos fabricantes.

Cuentan con un solo propulsor LAM o de apogeo, ya que éste se emplea pocas veces en la vida útil del satélite, posiblemente una sola vez, ya que el impulso que produce es muy grande y para el posicionamiento y orientación se emplean propulsores más pequeños. Los propulsores de apogeo de ambos satélites son similares.

Los siguientes propulsores son los bipropelentes para posicionamiento y orientación, en Satmex 6 todos estos propulsores son iguales, sin embargo, para Satmex 5 existen unos de menor impulso, ya que no se requieren grandes cambios en su posición.

Su combustible, oxidante y gas presurizador son los mismos.

Satmex 5 cuenta además con 4 propulsores eléctricos con impulso pequeño, esto es, para cambios de posición breves. Cabe señalar que Satmex 6 no emplea esto debido a que el fabricante no ha podido desarrollar esta tecnología de manera segura.

El Sistema de Propulsión Ion Xenón (XIPS) es lo último en tecnología de propulsión, es 10 veces más eficiente que los sistemas de propulsión actualmente usados. Para finales de 1998, cinco de los satélites en órbita de Hughes ya disponían del sistema XIPS.

Este tipo de propulsión es el resultado de varias décadas de investigación sobre el uso de la propulsión eléctrica como una alternativa a la propulsión química convencional. La gran ventaja de este tipo de sistemas es la eficiencia, ya que permite reducir en un 90% la masa de propelente de satélites diseñados para una vida útil de 12 a 15 años. El bajo porcentaje de combustible se refleja en un costo de lanzamiento menor, un incremento en componentes de carga útil, en el aumento de los años de operación del satélite o una combinación de todo lo anterior.

El sistema XIPS a bordo del satélite, se usa principalmente para mantener el control del mismo, los pequeños propulsores se requieren para corregir los efectos producidos por la gravedad lunar y solar que afectan al satélite y ponerlo de nuevo en la órbita correcta.

Los propulsores químicos usados actualmente están limitados sobre cuánta energía se libera durante el proceso de combustión. Los propulsores de ion dependen de la cantidad de potencia eléctrica disponible. Mayor potencia significa movimiento de iones más rápidamente y mayor propulsión.

El modelo de satélite de Hughes HS 601 HP, al cual pertenece Satmex 5, utiliza 500 [W] del arreglo solar de 8 [KW] del satélite. Las operaciones del sistema XIPS no tienen ningún efecto en las operaciones de telemetría y radiofrecuencia.

XIPS es posiblemente la contribución tecnológica singular más importante y exitosa de la siguiente década de satélites de comunicaciones.

<b>ESTRUCTURAL</b>		
Peso en el lanzamiento	4.1 T	5.626 T
Extensión máxima (de punta a punta de las alas)	26.2 m	31.1 m

El volumen y peso de Satmex 6 es mayor a Satmex 5, esto es comprensible debido a la potencia y número de transpondedores de más con que cuenta Satmex 6. Lo mismo sucede con su longitud.

### 4.3 Comparación económica entre Satmex 5 y Satmex 6

*Tabla comparativa*

Satélite	Fabricante	Costo de Fabricación [millones de dólares]	Costo de Lanzamiento [millones de dólares]	Costo del seguro [millones de dólares]
Satmex 5	Hughes Space & Communications	100	100	50
Satmex 6	Space Systems Loral	150	100	50

De esta tabla podemos observar que para solventar el costo de lanzamiento y de pago del seguro se requirió la misma inversión, en cambio, para el costo de construcción las cantidades varían un poco, considerando por supuesto, que no se trata del mismo fabricante

y que Satmex 6 se comenzó a construir unos años más tarde, lo cual significa un aumento en el costo de fabricación.

En conclusión, y como se describe en el capítulo 6, la construcción de un satélite, no es tarea sencilla, por lo mismo implica inversiones de millones de dólares, gasto que se espera sea redituable durante los años de vida útil del satélite en cuestión, esto es altamente probable aunque dependerá de la capacidad que tengan las empresas que ofrecen servicios satelitales para competir por un mercado que demanda poco en comparación con las ofertas que recibe. En el caso de Satmex se espera que su situación financiera mejore con los beneficios de su poderoso Satmex 6, que complementará su flota satelital actual.

## CAPÍTULO 5

### 5.1 Conceptos básicos para el enlace

Todo sistema de telecomunicaciones debe diseñarse para que en el receptor se obtenga una relación señal-ruido mínima que garantice su funcionamiento. En este capítulo se desarrollará la teoría y ejemplos de cálculos de enlace satelital para el Satmex 5 y el Satmex 6. Comenzaremos con la descripción de algunos conceptos importantes así como algunos de los efectos más significativos que se producen y afectan a las señales durante su propagación, que además deben ser considerados en los cálculos de enlace respectivos.

#### 5.1.1 Ángulos de elevación y azimut

Estos ángulos se definen con la finalidad de orientar a la antena de la estación terrena en la correcta dirección hacia el satélite con el que se pretende establecer una comunicación. Ambos son medidos respecto a la línea sobre la cual la antena tiene su ganancia máxima que sirve de referencia.

Se define a  $\phi$  como el azimut el cual se mide en sentido a las manecillas del reloj entre la línea que une a la estación terrena con el norte geográfico y la proyección horizontal local de la línea de máxima radiación de la antena que apunta hacia el satélite y a  $\theta$  como el ángulo de elevación, este último surge entre el plano horizontal local y la línea de vista entre la estación terrena y el satélite. Para evitar ruido o interferencia al plato parabólico,  $\theta$  debe ser mayor que  $10^\circ$ . Ambos ángulos dependen de la ubicación geográfica de la estación terrena y de la posición orbital del satélite. Para el cálculo de dichos ángulos se utilizan las siguientes fórmulas:

- Para el azimut :

$$\phi = 180^\circ - \phi' \quad \text{Estación en el hemisferio norte y al oeste del satélite}$$

$$\phi = 180^\circ + \phi' \quad \text{Estación en el hemisferio norte y al este del satélite}$$

$$\phi = \phi' \quad \text{Estación en el hemisferio sur y al oeste del satélite}$$

$$\phi = 360^\circ - \phi' \quad \text{Estación en el hemisferio sur y al este del satélite}$$

Donde:

$$\phi' = \text{angtan} \left[ \frac{\tan \Delta L}{\text{sen } \mathcal{L}} \right] \dots (5.1)$$

$$\Delta L = | \text{Longitud del satélite} - \text{Longitud de la estación terrena} |$$

$$\mathcal{L} = \text{Latitud de la estación terrena}$$

- Para el ángulo de elevación :

$$\theta = \text{angtan} \left[ \frac{c - (Re/h)}{\text{sen } \theta'} \right] \dots (5.2)$$

Donde:

$$c = \cos \lambda \cos \Delta L$$

$$\theta' = \text{angcos } c$$

Re = radio de la tierra  $\cong$  6378 Km.

h = radio de la órbita  $\cong$  42 164 Km.

Estas fórmulas suponen un satélite geoestacionario (latitud 0°), para una orientación diferente a ésta se recomienda consultar otras referencias.

Las estaciones terrenas que cuentan con sistemas sofisticados y platos de mayor tamaño tienen un equipo de rastreo que permite efectuar correcciones pequeñas en ambos ángulos de elevación de forma automática. Ya que aunque el satélite sea geoestacionario no implica que sea realmente fijo con relación a un punto de la Tierra sino que tiende a moverse un poco respecto a su posición original.

Cualquier estación terrena debe estar posicionada dentro de una de las huellas del satélite en cuestión. Cabe mencionar que existe un método gráfico aplicable a cualquier satélite geoestacionario para cualquier continente o hemisferio, para localizar dichos ángulos.

### 5.1.2 Rango

Se entiende por rango [ S ] a la distancia que existe entre una estación terrena y un satélite que puede calcularse como:

$$S = 35\,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos \theta'} \quad [\text{Km}] \quad \dots (5.3)$$

Donde:

$$\theta' = \text{angcos}[\cos \lambda \cos \Delta L]$$

### 5.1.3 Efecto Doppler

Este fenómeno recibe el nombre en honor al físico austriaco Christian Doppler quien explicó y cuantificó el efecto de por qué la frecuencia de las ondas sonoras cambiaba en un punto receptor fijo cuando la fuente que originaba estos sonidos se alejaba del receptor. Este efecto tiene muchas aplicaciones a altas frecuencias por ejemplo para medir la velocidad de los cohetes o de los satélites por medio de un radar, así como en astronomía se usa para medir la rotación y a velocidad a la que los astros se mueven.

Para expresar matemáticamente este fenómeno se utiliza la ecuación:

$$\frac{f_r - f_t}{f_t} = \frac{\Delta f}{f_t} = \frac{vt}{c} \quad \dots (5.4)$$

Donde:

$$vt = \text{componente de la velocidad del transmisor en la dirección hacia el receptor}$$

$$c = \text{velocidad de la luz}$$

Sin embargo, este efecto se considera despreciable para un enlace de satélites geostacionarios, siempre y cuando la señal transmitida sea de banda ancha. Este efecto sin embargo sí es relevante para satélites de órbita baja.

El efecto Doppler se presenta tanto en los enlaces de subida como en los enlaces de bajada, ya que tanto el satélite como las estaciones terrenas tienen equipos de recepción de ondas radioeléctricas. El efecto de estas desviaciones en frecuencia sobre un enlace de comunicaciones en particular depende de factores como el tipo de modulación empleado, de la técnica de multiplexaje y del método de acceso múltiple al satélite. En general los enlaces digitales son los más vulnerables a este efecto por sus técnicas de demodulación altamente coherentes. Existen correcciones para este tipo de efectos que pueden hacerse desde el propio satélite en los equipos a bordo o desde los extremos receptor o transmisor de los enlaces. Dependiendo de la técnica, la precisión y el costo cambian.

#### 5.1.4 Atenuación por absorción atmosférica

Cuando las frecuencias de transmisión son lo suficientemente altas, las ondas electromagnéticas interactúan con las moléculas de los gases en la atmósfera. Estas interacciones reducen la potencia de las señales conforme atraviesan la atmósfera y se intensifican en las frecuencias de resonancia del vapor de agua, oxígeno y bióxido de carbono. Para las frecuencias utilizadas por los satélites, las resonancias del vapor de agua son las más relevantes que está centrada en 22.2 GHz y la del oxígeno que está en los 60 GHz. Cabe señalar que las bandas de frecuencia que la Unión Internacional de Telecomunicaciones ha asignado para los satélites de comunicaciones (1-30 GHz) fueron elegidas de tal forma que se evitasen las zonas de mayor atenuación. Las bandas C, Ku y Ka se hallan en las zonas de baja absorción atmosférica, denominadas ventanas. Con esto la atenuación acumulada durante el paso de las señales de microondas se reduce al mínimo y se abaratan los costos de transmisión, para una calidad determinada. Para ángulos de elevación altos, y en las bandas C y Ku, estas pérdidas atmosféricas son muy pequeñas y pueden ser despreciadas. En la banda Ka son un poco mayores, pero cuando mucho de unos 0.4 dB, sin embargo si el ángulo de elevación de la estación terrena es muy bajo dichas pérdidas son mucho mayores y pueden alcanzar hasta 1dB en las bandas más altas. La atenuación total acumulada depende de la longitud exacta del trayecto de la señal a través de las capas atmosféricas responsables de esta absorción es decir, depende del ángulo de elevación de la estación terrena, de la altitud a la que está sobre el nivel del mar, la temperatura y la densidad del vapor de agua. Existe una gráfica con trayectoria en dirección al cenit, o sea directamente hacia arriba (*anexo5.1*) de tal forma que si alguna estación terrena tiene otro ángulo de elevación se debe corregir la estimación de dicha absorción atmosférica por medio de la siguiente fórmula:

Para  $10^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

$$[L_{a.a}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \operatorname{cosec}\theta \quad \dots (5.5)$$

Donde  $L_{\text{cenit}}$  es la lectura de la gráfica,  $\theta$  es el ángulo de elevación de la antena y  $L_{\text{a.a}}$  es la atenuación por absorción atmosférica. La atenuación por absorción atmosférica no es muy relevante cuando las condiciones son de cielo despejado, sin embargo, en presencia de lluvia esta atenuación es más significativa.

### 5.1.5 Atenuación por lluvia

La lluvia es un fenómeno meteorológico que afecta las frecuencias que se utilizan en las comunicaciones vía satélite. La presencia de lluvia en el trayecto de transmisión es la principal fuente de degradación para sistemas operando en frecuencias de microondas, particularmente cuando estas superan los 10 GHz. Las gotas de lluvia absorben y dispersan la energía de la onda, resultando una atenuación por lluvia (reducción en la amplitud de la señal transmitida), la cual degrada la confiabilidad y el desempeño de un enlace de comunicaciones. La forma de la gota de lluvia, una esfera achatada o una elipsoide, influye también en la polarización de la onda incidente, resultando en una despolarización por lluvia (una transferencia de energía de un estado de polarización a otro).

En las zonas donde se encuentra una estación terrena de transmisión o recepción, las señales portadoras son atenuadas conforme se propagan a través de la zona de lluvia, dichas señales deben recorrer una distancia ( $d$ ) que depende de la altura ( $h$ ) de las nubes con respecto del piso y del ángulo de elevación ( $\theta$ ) de la antena de la estación.

Los efectos que la lluvia produce en un enlace satelital se han estado estudiando durante muchos años por lo que en la actualidad se sabe que los efectos de la lluvia son dependientes de la longitud de onda o de la frecuencia ( conforme la longitud de onda se hace comparable al tamaño de las gotas, el efecto es más severo)\*\*, de la intensidad de lluvia (acumulación de agua por unidad de tiempo), distribuciones de tamaño de gotas en unidad de volumen, forma de la gota de lluvia y en menor cantidad, de la temperatura ambiente y de la presión atmosférica.

Durante este tiempo se han propuesto varios metodologías para caracterizar a las gotas de lluvia y sus efectos, existen dos tipos de modelos para pronosticar la atenuación por lluvia : los teóricos basados en las distribuciones esperadas de los tamaños de las gotas para cada intensidad de lluvia, tienen validez a cualquier frecuencia aunque también es conveniente verificarlos con datos medidos, y los empíricos como el DAH (útil en la banda Ka) y los empleados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones que se basan en obtener curvas que coincidan o se asemejen a las gráficas obtenidos con datos previamente medidos, sin embargo, aunque son considerados como buenos, no son tan exactos cuando para ciertas frecuencias no se tienen datos exactos. Para bandas de frecuencia futuras mayores a las Ku o Ka aún no se tienen datos para predecir dicha atenuación aunque ya son motivo de investigación. Cuando se realiza el diseño de un enlace satelital es importante tomar en cuenta el porcentaje del tiempo total en el que cierto valor especificado de mm/hora es excedido, ya que no siempre llueve, generalmente como referencia se usa el tiempo total de un año.

---

\*\*La banda más afectada es la Ka ( $\lambda=1\text{cm}$  a 30 GHz), después la banda Ku ( $\lambda=2\text{cm}$  a 14 GHz) y finalmente la banda C ( $\lambda=5\text{cm}$  a 6 GHz).

El saber cuántos minutos es probable que se sobrepase cierta cantidad de lluvia permite estimar la calidad del servicio en esa zona y el margen con el que los equipos deben ser sobredimensionados para que el servicio tenga buena calidad durante la mayor parte del tiempo, como ejemplo vemos: si se tiene una tasa excedida durante 0.1%, la diferencia con el 100% (100% - 0.1%) o sea 99.9% será la disponibilidad del enlace de cada año.

Estas pérdidas se tabulan estadísticamente en función de las medias de lluvias en mm/hora. El mundo se encuentra dividido en regiones en función del porcentaje de lluvia, de modo que en el lugar donde se quiera instalar la estación se debe tener una visión previa de las posibles pérdidas debido a este factor. Esto se encuentra especificado en gráficas que pueden usarse para encontrar las atenuaciones superadas para porcentajes de lluvia dados, donde cada región tiene su propia tasa de lluvia que es sobrepasada cierto porcentaje del tiempo en un año. Sin embargo es importante mencionar que la señal no es afectada de igual manera en todos los segmentos de su trayectoria, ni durante todo el tiempo que llueve además, la distribución del agua no es uniforme, por lo que la distribución y la intensidad de lluvia puede variar dentro de una misma región de un año a otro. Para fines prácticos, existen métodos sencillos (establecidos por la CCIR) que permiten calcular con buena precisión los niveles de atenuación en función de la frecuencia y del tipo de polarización de la señal. Sin embargo, es muy común que el dueño de un sistema satelital proporcione a los usuarios la información sobre márgenes de lluvia por regiones que deben considerar para su utilidad. Tal es el caso de Satélites Mexicanos (Satmex) la cual proporciona los márgenes de lluvia de acuerdo a sus zonas de cobertura (*anexo 5.1*), es por ello que no mencionaremos otro tipo de cálculo de atenuación por lluvia, ya que para fines de esta tesis no será necesario, sin embargo dicho método puede consultarse en la referencia [1]

Dentro de las bandas de frecuencia del satélite Satmex 5 (C y Ku), la banda Ku es la más afectada debido a su longitud de onda.

Otros factores que contribuyen a la degradación de la señal principalmente en dos capas de la atmósfera: la Troposfera y la Ionosfera.

### 5.1.6 Efectos de la Troposfera

**Atenuación.**- La absorción molecular de los gases contenidos en la atmósfera y la atenuación producida por los hidrometeoros son las principales causas de la atenuación atmosférica. La atenuación por absorción molecular se debe principalmente a las moléculas de oxígeno y vapor de agua. Para frecuencias inferiores a 10Ghz es prácticamente despreciable, mientras que a frecuencias superiores presenta un comportamiento creciente con la frecuencia y la aparición de rayas de atenuación asociadas a las frecuencias de resonancias de las moléculas. Además se debe agregar la atenuación por lluvia mencionada anteriormente, las nubes, la niebla, el granizo y la nieve que en general son despreciable a bajas frecuencias (bandas L, C y Ku)

**Refracción.**- El índice de refracción de la atmósfera varía en función de la concentración de gases. Es por este motivo, para una atmósfera normal, que el índice de refracción disminuye con la altura. El índice de refracción del aire es muy próximo a la unidad. Estos cambios en el

índice de refracción producen un efecto llamado centelleo consistente en fluctuaciones rápidas de la amplitud, la fase y el ángulo de llegada de las microondas.

### 5.1.7 Efectos de la Ionosfera

*Comunicaciones ionosféricas.*-La existencia de la ionosfera permite, tal como comprobó Marconi, las comunicaciones a grandes distancias. El efecto de la ionosfera es distinto para las diferentes bandas de frecuencias. A frecuencias bajas y muy bajas (bandas de LF y VLF) la ionosfera supone un cambio brusco en términos del índice de refracción atmosférico. Esta variación abrupta produce una reflexión de la onda incidente en la parte baja de la ionosfera. La ionosfera es un medio cuyo índice de refracción varía con la altura. La densidad de ionización aumenta con la altura hasta alcanzar el máximo entre los 300 y 500 Km y también depende la hora del día, las estaciones del año y la intensidad de la actividad solar. Sobre las ondas satelitales se produce el centelleo y la rotación de Faraday la cual se refiere a la desviación indeseable de la dirección del campo eléctrico de una señal de microondas con polarización lineal. Sus principales consecuencias son que la potencia que llega en la polarización deseada lleva la potencia disminuida ya que parte de la potencia original se convierte en una componente ortogonal y la otra es que se si se usa una polarización horizontal y vertical simultáneamente, se crea una componente con polarización cruzada que produce ruido. El efecto Faraday es importante en las bandas UHF, L y C, sin embargo en las bandas Ku y Ka deja de ser un problema.

*Fuentes De Ruido Externo.*- El ruido externo es debido a la emisión radioeléctrica de otras fuentes distintas a las que se desea recibir. Los fenómenos de emisión radioeléctrica son de distinta naturaleza, como los que se encuentran fuera de la Tierra como el ruido galáctico debido a la radiación en la banda de radiofrecuencia de las estrellas que forman la galaxia y la radiación de origen solar y el ruido cósmico de fondo. Además se tiene la emisión radioeléctrica de la Tierra y de la atmósfera, así como ruido de origen atmosférico debido a las descargas eléctricas (rayos, tormentas, etc.), sin olvidar que el ruido de origen humano e industrial debido a motores eléctricos, líneas de alta tensión, entre otros también afecta a las señales.

## 5.2 Configuración del Enlace

Esencialmente, un sistema satelital consiste de tres secciones básicas: un enlace de subida, un transpondedor satelital y un enlace de bajada.

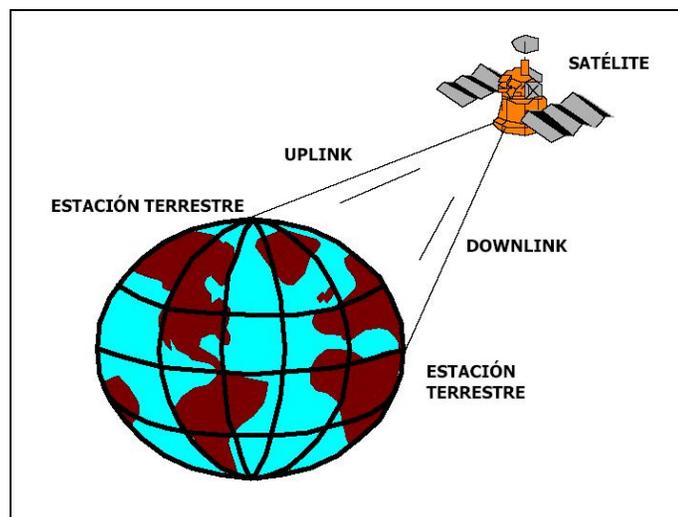
*Enlace de subida.*-El principal componente dentro de la sección de subida satelital, es el transmisor de estación terrena. Un típico transmisor de la estación terrena consiste de un modulador de frecuencia Intermedia (IF), un convertidor de microondas de IF a Radio frecuencia (RF), un amplificador de alta potencia (HPA) y algún medio para limitar la banda del último espectro de salida (por ejemplo, un filtro paso-banda de salida). El modulador de IF convierte las señales de banda base de entrada a una frecuencia intermedia modulada en FM,

en PSK o en QAM. El convertidor (mezclador y filtro paso-banda) convierte la IF a una frecuencia de portadora de RF apropiada. El HPA proporciona una sensibilidad de entrada adecuada y potencia de salida para propagar la señal al transponder del satélite. Los HPA comúnmente usados son tubos de onda progresiva.

*Transponder.*- Un transpondedor típico satelital consta de un dispositivo para limitar la banda de entrada (BPF), un amplificador de bajo ruido de entrada (LNA), un cambiador de frecuencias, un amplificador de potencia de bajo nivel y un filtro paso-banda de salida. Este transpondedor es un repetidor de RF a RF. Otras configuraciones de transpondedor son los repetidores de IF, y de banda base, semejantes a los que se usan en los repetidores de microondas.

*Enlace de bajada .-* Un receptor de estación terrena incluye un BPF de entrada, un LNA y un convertidor de RF a IF. Nuevamente, el BPF limita la potencia del ruido de entrada al LNA. El LNA es un dispositivo altamente sensible, con poco ruido. El convertidor de RF a IF es una combinación de filtro mezclador /paso-banda que convierte la señal de RF recibida a una frecuencia de IF.

La configuración típica de un enlace satelital descrita en estas tres etapas se muestra en la figura 5-1 (a) y 5-2 (b).



**Fig. 5-1 (a)** Configuración de un enlace satelital

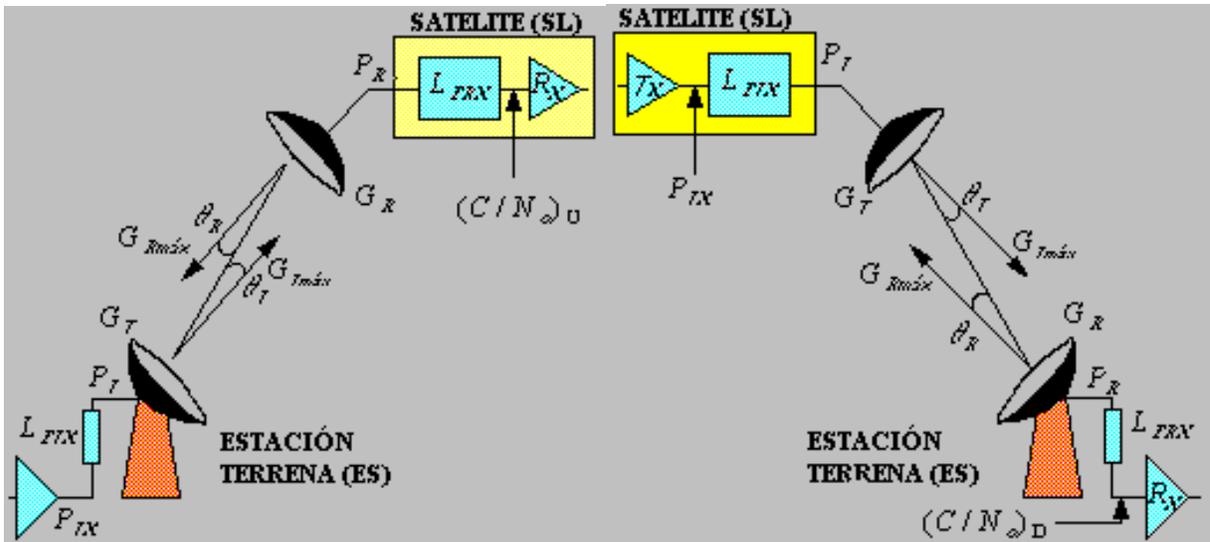


Fig. 5-1 (b) Configuración de un enlace satelital

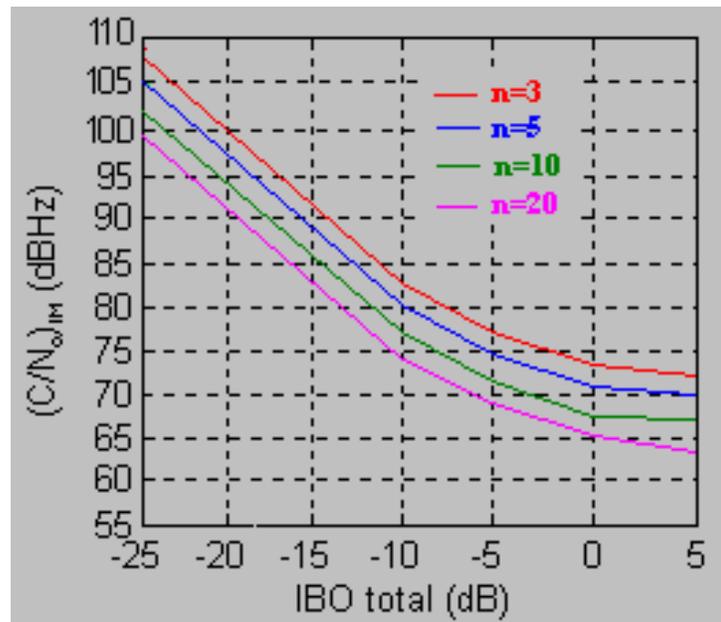
Los elementos a considerar en la Estación Terrena ( Parte Transmisora) son el amplificador de potencia ( $P_{TX}$ ) y la antena que radia la señal portadora amplificada. Una vez que esta señal llega al satélite se deben considerar las características de la antena receptora y del preamplificador de bajo ruido conectado después de ella (en la figura expresado como  $R_X$  ), durante la propagación de subida , la señal recibirá atenuación debida al espacio libre, por absorción atmosférica, por lluvia y por despuntamiento de los ejes de las antenas de recepción y transmisión así como sufrirá sin duda la introducción de ruido y las interferencias de radiofrecuencia. Entonces esto se restará a la potencia original de la señal y se le agregará la ganancia de la antena receptora del satélite ( $G_R$ ), lo que nos dará como resultado una portadora (carrier ) representada con la letra C a la entrada del  $R_X$  y la suma de las interferencias y ruido nos dará como resultado el ruido total a la subida (noise) representado por la letra N referido exactamente en el mismo punto (la entrada del  $R_X$  ) con esto obtenemos la relación portadora ruido de subida (uplink) expresada como  $(C / N_0)_U$  en la figura. Este cociente se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$\left( \frac{C}{N_0} \right)_{subida} = [ PIRE_{Est.Terrena} ]_{dBW} - [ L_{propagación} ]_{dB} + \left( \frac{G}{T} \right)_{satélite} \text{ dB / K} - [ 10 \log k ]_{dBHz} \dots(5.6)$$

Una vez que la señal ha llegado al satélite será procesada en su interior para ser transmitida de regreso a la Tierra una vez que haya sido amplificada en el transpondedor por su amplificador de potencia (TWT). En caso de que exista más de una portadora dentro del amplificador, se producirá ruido de intermodulación. Cuando se usa un acceso del tipo TDMA no aparecen problemas de intermodulación, porque en cada intervalo de tiempo se amplifica una portadora. Ahora bien, cuando el acceso es del tipo FDMA, CDMA o un híbrido FDMA/TDMA aparecen los llamados productos de intermodulación, que originan señales a frecuencias iguales a la combinación lineal de las frecuencias usadas en las portadoras iniciales. Fundamentalmente se ha de tener en cuenta solamente los productos de intermodulación de orden 3 (que son los más dañinos) porque muchos de los productos de intermodulación caen en frecuencias que quedan

fuera del ancho de banda de los amplificadores empleados por el satélite y no afectan a las señales amplificadas

Se sabe que mientras mayor sea la potencia de salida del amplificador habrá mayor ruido de intermodulación, por lo que a bordo del satélite se define un cociente de intermodulación  $(C / N_0)_i$ , este valor lo especifica por medio de gráficas o tablas, el propio fabricante del satélite. En la siguiente figura se muestran algunas curvas típicas del cociente de potencias  $(C / N_0)_i$  en función del número “n” de portadoras y del back-off de entrada (IBO Input Back-Off) de un TWT, estas curvas no se deducen fácilmente y se suministran por medio del fabricante de cada satélite.



**Fig.5-2** Relación de la potencia de la portadora sobre la densidad de ruido de intermodulación, en función del back-off de entrada y para “n” portadoras

Finalmente la última etapa del enlace es la trayectoria de bajada, el procedimiento es el mismo que el enlace de subida solo que a la inversa, ahora la señal parte de la antena transmisora del satélite previamente amplificada por el transpondedor y la ganancia de la antena, conforme la señal desciende, se atenúa exactamente por las mismas razones que en el enlace de subida y al llegar al amplificador de bajo ruido ( $R_x$  de la estación terrena) con un nivel de potencia  $C$  donde también se introduce ruido ( $N$ ), entonces se tiene otro cociente de potencias de bajada (downlink) expresado como  $(C / N_0)_D$ . Es importante remarcar que la frecuencia de la portadora en el enlace de bajada es diferente a la del ascendente (Ver Fig. 5-6) por lo que los niveles de atenuación y ruido también cambian. De la misma forma podemos expresar este concepto como:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{bajada} = [ \text{PIRE}_{\text{satélite según la ET}} ]_{\text{dBW}} - [ L_{\text{propagación}} ]_{\text{dB}} + \left(\frac{G}{T}\right)_{\text{Est.Terrena}}_{\text{dB/K}} - [ 10 \log k ]_{\text{dBHz}} \dots (5.7)$$

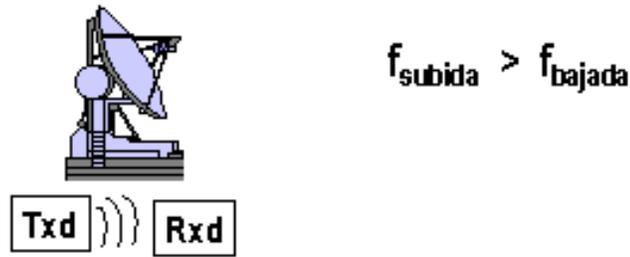


Fig. 5-3 Relación de las frecuencias del enlace

Para entender estas ecuaciones se explicarán los conceptos en la siguiente sección.

### 5. 3 PIRE, Densidad de flujo y atenuación en el espacio libre

- El concepto de *PIRE* (Potencia Isotrópica Radiada Efectiva) se entiende como el producto de la ganancia de la antena transmisora  $G_T$  la cual es máxima en dirección al satélite si es que se encuentra bien orientada de la estación terrena y la potencia de salida del amplificador  $P_T$  para un enlace de subida, entonces,

$$PIRE = P_T G_T \text{ [W]} \dots (5.8)$$

En decibeles:

$$[PIRE]_{dBW} = 10 \log P_T + 10 \log G_T \text{ [dBW]} \dots (5.9)$$

y en donde la ganancia máxima para una antena parabólica se calcula:

$$G = \eta(\pi f D / c)^2 \dots (5.10)$$

En decibeles:

$$[G]_{dB} = 10 \log \left[ \eta \left( \frac{\pi f D}{c} \right)^2 \right] \dots (5.11)$$

$\eta$  = eficiencia de la antena, valor estándar (entre 0.5 - 0.6 )

$f$  = frecuencia de subida al satélite en MHz

$D$  = diámetro de la antena en metros.

$c$  = velocidad de la luz (  $3 \times 10^8$  m/s)

Para el enlace de bajada se aplica el mismo razonamiento, en este caso:

$$PIRE = P_{\text{Transpondedor}} G_{\text{Satélite}} \text{ [W]} \dots (5.12)$$

$$[\text{PIRE}]_{\text{dBW}} = 10 \log P_{\text{Transpondedor}} + 10 \log G_{\text{Satélite}} \text{ [dBW]} \dots (5.13)$$

El fabricante de cada satélite proporciona los mapas de contornos de PIRE con los niveles en dBW que son radiados hacia diferentes puntos de la zona de cobertura (para el enlace de bajada) Estos contornos ya incluyen la potencia máxima de cada amplificador, la ganancia máxima de la antena y las pérdidas que se mencionan en la siguiente sección.

- *La densidad de flujo* de potencia se obtiene por cada unidad de superficie, para antenas isotrópicas, donde la potencia  $P_T$  se distribuye de manera uniforme en un frente de onda esférico con un área igual a  $4\pi r^2$  a una distancia  $r$  desde la antena. Expresada como:

Para una antena Isotrópica:

$$F_d = P_T / 4\pi r^2 \text{ [ W / m}^2 \text{ ] } \dots (5.14)$$

Para una antena Directiva donde la ganancia amplifica la densidad de flujo si está bien orientada:

$$F_d = ( P_T / 4\pi r^2 ) * G_T \text{ [ W / m}^2 \text{ ] } \dots (5.15)$$

$$F_d = ( \text{PIRE} / 4\pi r^2 ) \text{ [ W / m}^2 \text{ ] } \dots (5.16)$$

- *La atenuación en el espacio libre* se refiere a la disminución de la potencia de la señal portadora debida a la enorme distancia entre la estación terrena y el satélite durante el enlace. Se calcula como sigue:

$$L_{e.l.} = (4\pi r f / c)^2 \dots (5.17)$$

En decibeles:

$$[ L_{e.l.} ]_{\text{dB}} = 20 \log (4\pi r f / c) \dots (5.18)$$

Simplificando tenemos:

$$[ L_{e.l.} ]_{\text{dB}} = 20 \log r + 20 \log f + 92.44 \dots (5.19)$$

$r$  = rango (S) en Km.

$f$  = frecuencia en GHz

La atenuación en el espacio libre es solo una parte de la atenuación total del enlace conocida como pérdidas de propagación  $L_{\text{propagación}}$ , que se obtiene como:

$$L_{\text{propagación}} = L_{e.l.} + L_{a.a} + L_{\text{lluvia}} \dots (5.20)$$

$L_{e.l.}$  = Atenuación en el espacio libre

$L_{a.a}$  = Atenuación por absorción atmosférica (obtenida de tablas)

$L_{\text{lluvia}}$  = Atenuación por lluvia (obtenida de tablas)

#### 5.4 Pérdidas y ruidos en el enlace

Además de las atenuaciones antes mencionadas, existen otras pérdidas (por desapuntamiento y en los conectores) así como ruido (ruido térmico y la temperatura de ruido de las antenas, los amplificadores y los atenuadores) que influyen en el enlace satelital, en esta sección se describirán de manera muy general, para más información consultar la referencia [1].

##### *Pérdidas por desapuntamiento*

Estas pérdidas ocurren cuando los ejes de máxima radiación de las antenas transmisora de la estación terrena y receptora del satélite (para el enlace de subida) no están alineados, lo que hace que se pierda algo de la ganancia con relación a la idónea. Lo mismo sucede en el enlace de bajada pero a la inversa.

##### *Pérdidas en los conectores*

En una transmisión estación terrena –satélite o bien satélite – estación terrena la señal se atenúa por la línea que une al amplificador de microondas con el alimentador de la antena. Entonces, la línea y los conectores asociados añaden una pérdida de potencia denominada  $L$  que depende de la frecuencia, el tipo de cable o de guía, la longitud de los cables y el material con que estén hechos, en recepción estas pérdidas también ocurren, de modo que ocurren tanto en el tramo ascendente como en el descendente. Para cada tramo de guía y sus respectivos conectores normalmente se considera entre 0.5 y 1.0 dB de pérdida cuando se realizan cálculos. Si se conocen los contornos de PIRE y G/T del satélite, todas estas pérdidas ya fueron consideradas para el satélite en transmisión y recepción, entonces faltaría considerar sólo las pérdidas en las estaciones terrenas.

##### *Ruido en el enlace*

La principal causa de ruido eléctrico en los equipos de recepción y en sus amplificadores se debe al movimiento térmico aleatorio de los electrones en su interior, este ruido recibe el nombre de ruido térmico, también los componentes que producen pérdidas en las antenas, las radiaciones provenientes del espacio o de la Tierra así mismo los fenómenos meteorológicos como la lluvia también introducen ruido térmico que puede ser calculado para tomarse en cuenta en los cálculos y saber cuál es la cantidad de potencia de ruido total que se tendrá en el enlace. Estos ruidos se pueden sumar pero para que esta acción sea correcta se deben calcular respecto a un mismo punto el cual normalmente es la entrada al amplificador de bajo ruido en el extremo de recepción.

##### *Ruido Térmico*

Las fuentes de ruido térmico producen una potencia de ruido que podemos expresar mediante la fórmula:

$$N = k T B \dots (5.21)$$

$N$  = potencia de ruido [W]

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

$B$  = ancho de banda del ruido [Hz]

Este tipo de ruido presenta una propiedad de ruido blanco es decir, tiene una distribución plana en el espectro de frecuencias, de aquí se define la densidad de ruido  $N_0$  que es la que se usa para realizar los cálculos de enlace :

$$N_0 = \frac{N}{B} = k T \quad [\text{W/Hz}] \quad \dots \quad (5.22)$$

Dado que el punto donde se mide el ruido térmico es a la entrada del amplificador de bajo, para modelar esto se sustituye al amplificador real (con ruido) por un amplificador ideal (sin ruido) con una resistencia en serie a la entrada. Entonces su temperatura de ruido será la temperatura equivalente  $T_e$  (normalmente proporcionada por el fabricante para la banda C ) de la resistencia, que genera la misma potencia de ruido a la salida del amplificador ideal que la generada por el amplificador real cuando éste no tiene ruido a la entrada.

#### *Figura de ruido*

Para el caso de las bandas Ku y Ka, no se especifica la temperatura de ruido  $T_e$ , sino que se tiene la figura de ruido  $F$  definida como un cociente de potencias de ruido donde el numerador es la potencia total de ruido a la salida del amplificador y en el denominador se encuentra una potencia parcial producida por un ruido existente a la entrada del amplificador, se asume una temperatura a la entrada  $T_0$  igual a la temperatura ambiente (290 K).

$$F = N_{\text{salida del amplificador}} / N_{\text{parcial}} \quad \dots \quad (5.23)$$

Si se proporciona la Figura de ruido podemos calcular la temperatura equivalente del amplificador como:

$$T_e = T_0 (F-1) \quad \dots \quad (5.24)$$

$$T_e = 290 (F-1) \quad \dots \quad (5.25)$$

Un sistema de recepción generalmente tiene varios componentes electrónicos conectados en serie (amplificadores de bajo ruido conectados en cascada), entonces para “n” amplificadores conectados en serie también podemos calcular la  $T_e$  como sigue:

$$T_e = T_1 + (T_2/G_1) + (T_3/G_1G_2) + \dots + (T_n/G_1G_2 \dots G_{n-1}) \quad \dots \quad (5.26)$$

Donde  $T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas de ruido en las etapas 1 y 2 así como  $G_1$  y  $G_2$  son las ganancias en esa etapa y  $T_n$  y  $G_n$  es la temperatura y la ganancia en la etapa “n”. Es de esperarse que la principal contribución a la temperatura de ruido la proporciona el primer amplificador y que la de las etapas siguientes ya no son significativas y se pueden despreciar.

*Temperatura de ruido de un atenuador*

Como ya se mencionó estos atenuadores pueden considerarse como resistencias donde la temperatura de ruido de las mismas depende del grado de atenuación y de la temperatura física o ambiente  $T_f$  que tienen, se calcula como:

$$T_{L(salida)} = T_f \left( 1 - \frac{1}{L} \right) \text{ [K] } \dots(5.27)$$

$L$  = atenuación producida

$T_L$  = temperatura de ruido a la salida del atenuador

$T_f$  = temperatura ambiente del atenuador; para objetos en la superficie terrestre se considera como 290 K en general, 270 K para las nubes y 280 K para la lluvia.

Esta temperatura de ruido está referida a la salida de la atenuador para que pueda sumarse con el efecto del amplificador de bajo ruido, para expresarlo en términos de la entrada tenemos:

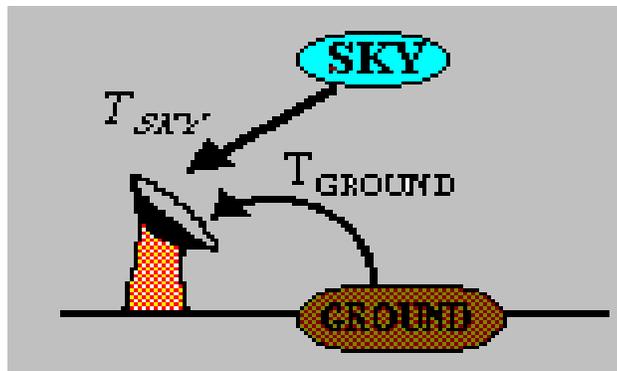
$$T_{L(entrada)} = T_f \left( 1 - \frac{1}{L} \right) (L) \text{ [K] } \dots (5.28)$$

$$T_{L(entrada)} = T_f (L-1) \text{ [K] } \dots (5.29)$$

*Temperatura de ruido de una antena (enlace de bajada)*

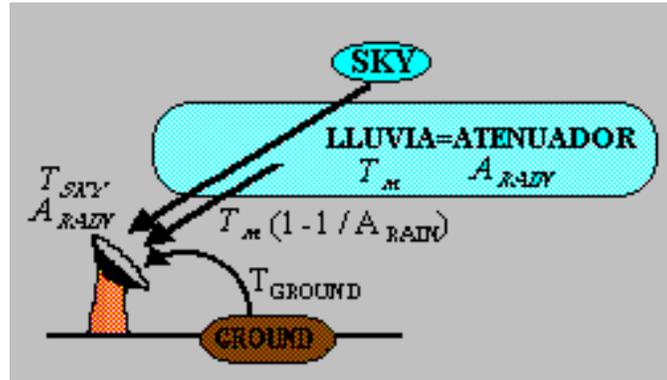
El ruido que una antena capta puede provenir de varias fuentes: ruido de la troposfera, ruido cósmico (frecuencias de radio) y galáctico (concentración de estrellas), ruido de la lluvia, interferencias de enlaces terrestres, ruido del sol y la luna, ruido del suelo.

A la temperatura de ruido debida al efecto combinado del ruido cósmico, el ruido galáctico y ruido troposférico se le denomina  $T_{sky}$  o temperatura con cielo despejado, la cual puede ser obtenida mediante gráficas en función de la frecuencia de recepción y del ángulo de elevación de la antena, esta temperatura así como la proporcionada por la Tierra  $T_{ground}$  (50 K para ángulos entre  $0^\circ$  y  $10^\circ$  y 10 K para ángulos entre  $10^\circ$  y  $90^\circ$ ) se muestran en la siguiente figura:



**Fig. 5-4** Temperatura de ruido de la antena con cielo despejado

En presencia de lluvia se añade ruido al sistema:



**Fig. 5-5** Temperatura de ruido de la antena en presencia de lluvia

Dicha temperatura de ruido se calcula utilizando la ecuación 5.algo con  $T_f = 280$  K por la lluvia:

$$T_{lluvia} = 280 \left( 1 - \frac{1}{A_{lluvia}} \right) [K] \dots (5.30)$$

$$A_{lluvia} = L_{lluvia}$$

Existen algunas gráficas que la UIT ha publicado para obtener la temperatura de ruido de las antenas de 10 m de diámetro en las bandas Ku y Ka. Ver referencia [1]

*Temperatura de ruido de una antena (enlace de subida)*

Para la temperatura de ruido de una antena receptora en el enlace de subida (antena del satélite) es más simple ya que ésta apunta hacia la Tierra y su haz de radiación es más angosto que el de las antenas en la estación transmisora, entonces recibe la radiación térmica de la Tierra que es muy próxima a los 290 K sin olvidar que esta temperatura puede variar para los diferentes satélites ya que depende de la frecuencia y del tipo de masa donde la antena está orientada. Normalmente el enlace ascendente proporciona menor cantidad de ruido al sistema de comunicación que el enlace descendente, por lo mismo, la lluvia no aporta mucho ruido en el enlace de subida porque la antena del satélite siempre apunta hacia la tierra con temperatura 290 K.

**5.5 Figura de mérito G/T y densidad de flujo de saturación**

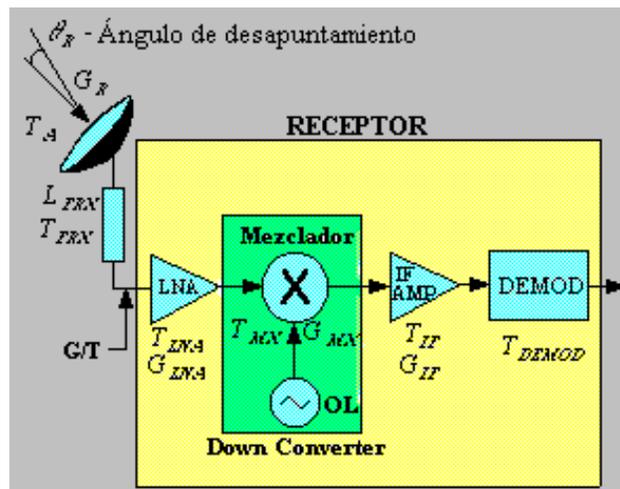
- La figura de mérito del satélite se define como:

$$\left[ \left( \frac{G}{T} \right)_{\text{satélite}} \right]_{\text{dB/K}} = \left[ \frac{G_{\text{max.}}}{T_s} \right] - \text{Pérdidas por desapuntamiento} \dots (5.31)$$

y conectores en el receptor

Ts = temperatura de ruido en la entrada del amplificador

El valor de la figura de mérito G/T es particular para cada satélite ya que depende de las características de su antena (ganancia y patrón de radiación), del número de transpondedores, de los elementos del subsistema de comunicaciones y de la posición de la estación terrena transmisora dentro de los contornos de iluminación del satélite. Generalmente se tienen disponibles los contornos de G/T de los satélites y no es necesario conocer las características de la antena, los conectores el amplificador de bajo ruido y los transpondedores del mismo. Una estación terrena receptora también tiene su propia figura de mérito (Fig. 5-9). La figura de mérito del equipo receptor del satélite refleja su capacidad para conseguir un alto valor de la relación señal a densidad espectral de potencia. En nuestro caso, la figura de mérito del Satmex 5 es conocida como se observa en la tabla de especificaciones técnicas (*anexo 5.1*), así como también se conocen los contornos de G/T para ubicar a las estaciones terrenas, lo cual simplifica mucho los cálculos de enlace. Para el Satmex 6 también contamos con el G/T del satélite según su tabla de especificaciones (*anexo 5.1*), pero aún no se cuenta con los contornos definitivos de G/T, sin embargo existe una forma de calcular este dato para las estaciones terrenas aunque no sea tan simple como en el caso del Satmex 5.



**Fig. 5-6** Figura de mérito de la estación terrena receptora

- El concepto de Densidad de flujo de saturación nos proporciona información de cuánta potencia se requiere en el enlace ascendente para saturar un transpondedor, el límite de PIRE permisible para una estación terrena determinada y cómo garantizar que el amplificador de alta potencia del transpondedor funcione con cierto back-off de

entrada, tomando ya en cuenta la posición del atenuador. Como se mostró anteriormente la densidad de flujo se expresa como:

$$F_d = (PIRE / 4\pi r^2) \quad [W / m^2] \dots (5.32)$$

Normalmente en lugar de  $F_d$  se conoce a la densidad de flujo como  $\phi$  entonces,

$$\phi = (PIRE / 4\pi r^2) \quad [W / m^2] \dots (5.33)$$

además sabemos que:

$$L_{e.l.} = (4\pi r / \lambda)^2 \dots (5.17)$$

Despejando  $r$ :

$$r^2 = L_{e.l.} \lambda^2 / (4\pi)^2 \dots (5.34)$$

Sustituyendo en (5.17):

$$\phi = PIRE [4\pi / L_{e.l.} \lambda^2] \quad [W / m^2] \dots (5.35)$$

En decibeles:

$$\phi = [PIRE]_{dBW} - [L_{e.l.}]_{dB} + [10 \log (4\pi / \lambda^2)]_{dB/m^2} \quad [dBW/m^2] \dots (5.36)$$

Donde  $L_{e.l.} \neq L_{propagación}$

Sustituyendo en la ecuación (5.6)

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{subida} = [\phi]_{dBW/m^2} - [10 \log (4\pi / \lambda^2)]_{dB/m^2} + \left(\frac{G}{T}\right)_{satélite} dB/K + 228.6 [dBHz] \dots (5.37)$$

En términos de la frecuencia:

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{subida} = [\phi]_{dBW/m^2} - 21.45 - 20 \log f + \left(\frac{G}{T}\right)_{satélite} dB/K + 228.6 [dBHz] \dots (5.38)$$

Si el valor de  $\phi$  es tal que satura al amplificador de alta potencia del transpondedor, sin atenuar nada a entrada para controlar la ganancia del mismo, dicha variable se designa como  $\Psi$  y se dice que es la densidad de flujo de saturación y este dato también es especificado por el fabricante  $\Psi$  depende de la distancia entre las estaciones terrenas y el satélite y de las propiedades de recepción de la antena así como de todos los elementos intermedios entre la antena receptora del satélite y el amplificador de alta potencia. Entonces para cielo despejado y con el valor de saturación  $\Psi$  tenemos:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{subida}} = [\Psi]_{\text{dBW/m}^2} - 20 \log f + \left(\frac{G}{T}\right)_{\text{satélite}}_{\text{dB/K}} + 207.15 \text{ [dBHz]} \dots (5.39)$$

En el caso que se proporcione la densidad de flujo de saturación, se puede calcular el PIRE con el que las estaciones terrenas deben transmitir en conjunto para saturar el transpondedor que estén ocupando. En el caso de que una sola estación ocupara el transpondedor completo podemos calcular el PIRE como sigue:

$$\text{PIRE} = [\Psi]_{\text{dBW/m}^2} - 20 \log f + [L_{\text{e.l.}}]_{\text{dB}} - 21.45 \text{ [dBW]} \dots (5.40)$$

Con la frecuencia en GHz.

Dentro de las especificaciones del Satmex 5 y del Satmex 6 también contamos con el dato de la densidad de flujo de saturación.

## 5.6 Relación Total de Potencias

Al finalizar el enlace podemos calcular la potencia total de ruido que afectó a la portadora durante el trayecto completo, dicha potencia de ruido proviene de varias fuentes. Las contribuciones del enlace de subida, del ruido de intermodulación y del enlace de bajada pueden sumarse siempre y cuando se calculen con valores absolutos. El procedimiento para lograr esto se define a continuación:

- Las relaciones parciales  $(C/N_0)$  se convierten de decibeles a valores absolutos.
- Se sacan los recíprocos
- Se suman los recíprocos anteriores
- Se obtiene el recíproco de la suma anterior
- Por último se convierte el resultado anterior a decibeles

La ecuación que define este procedimiento se define como:

$$1 / (C/N_0)_{\text{total}} = 1 / (C/N_0)_{\text{subida}} + 1 / (C/N_0)_{\text{intermodulación}} + 1 / (C/N_0)_{\text{bajada}} \dots (5.41)$$

Esta ecuación tiene un punto máximo que corresponde al mejor cociente posible  $(C/N_0)_{\text{total}}$ . Este punto corresponde al back-off de entrada en el transpondedor del satélite.

Una vez que se ha detallado la teoría necesaria para realizar los cálculos de un enlace satelital, procederemos a desarrollar algunos ejemplos que nos muestren el desempeño de los dos satélites en cuestión, el Satmex 5 y el Satmex 6.

**5.7 Ejemplos de cálculos de enlace para Satmex 5 y Satmex 6**

**EJEMPLO 1**

Considérese un enlace Cd. de México – Washington D.C. utilizando uno de los transpondedores del **Satmex 5** en la banda Ku-1 (cobertura NAFTA) utilizando los siguientes datos:

Frecuencia de subida: 14.3 [GHz] y Frecuencia de bajada: 12 [GHz]

Diámetros de las antenas de 2.4m (Cd. de México) y 3m (Washington D.C)

La posición geográfica de la estación terrena transmisora Cd. de México: Latitud 19.4° N,

Longitud 99.15° O y la Washington D.C. es Latitud 38.9° N y Longitud 77.02° O.

Longitud del satélite 116.8° O

La estación transmite a una tasa de 64 kbps y sistema QPSK con Potencia de 400 [W].

Considerar un back-off de entrada del TWT de 5 [dB] para Satmex 5 y de -3 [dB] para Satmex 6.

Solución

*Enlace de subida*

1.- Se debe corregir el ángulo de elevación, el azimut y el rango según se explicó anteriormente como sigue:

$\Delta L = | \text{Longitud del satélite} - \text{Longitud de la estación terrena} |$

$$\Delta L = | 116.8^\circ - 99.4^\circ | = 17.5^\circ$$

$\perp =$  Latitud de la estación terrena

$$\begin{aligned} \phi' &= \text{angtan} [ \tan \Delta L / \text{sen} \perp ] \\ \phi' &= \text{angtan} [ \tan (17.5) / \text{sen} (19.15) ] \\ \phi' &= 43.86^\circ \end{aligned}$$

Debido a que la estación terrena se encuentra situada en el hemisferio Norte y al Este del satélite utilizamos la

siguiente fórmula para obtener el ángulo real del azimut:

$$\begin{aligned} \phi &= 180^\circ + \phi' \\ \phi &= 180^\circ + 43.86^\circ \\ \phi &= \mathbf{223.768^\circ} \end{aligned}$$

Ahora para el cálculo del ángulo de elevación:

$$\theta = \text{angtan} [ \frac{c - (Re/h)}{\text{sen}\theta'} ]$$

$$\theta = \tan^{-1} [ \frac{\cos(19.4)\cos(17.5) - 0.15127}{\text{sen}[\text{ang} \cos(\cos 19.4 \cos 17.5)]} ]$$

$$\theta = \mathbf{59.615^\circ}$$

Calculando el rango:

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

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

$$\theta' = \arccos[\cos(17.5) \cos(19.4)]$$

$$\theta' = 25.898$$

$$S = 35\,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos(25.898)}$$

$$\mathbf{S = 36\,537.776 \text{ [Km]}}$$

2.- Calculamos el PIRE de la estación terrena transmisora de acuerdo a:

$$\text{PIRE} = P_T G_T$$

Donde:

$$\mathbf{P_T = 400 \text{ [W]}}$$

Y  $G_T$  para una eficiencia de 0.55 se obtiene de:

$$G = \eta(\pi f D / c)^2$$

$$G_T = 0.55 (\pi (14300 \times 10^6 (2.4))) / (3 \times 10^8)^2$$

$$G_T = 71.04 \text{ [kW]}$$

$$G_T \text{ [dB]} = 10 \log(71.04)$$

$$\mathbf{G_T = 48.51 \text{ [dB]}}$$

Entonces el PIRE:

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

$$[\text{PIRE}]_{\text{dBW}} = 10 \log(400) + 48.51$$

$$\mathbf{[\text{PIRE}]_{\text{E.Tx}} = 74.53 \text{ [dBW]}}$$

A este resultado se le restan las pérdidas en los conectores  $L_{\text{conect}} = 1 \text{ [dB]}$

Entonces el PIRE queda:

$$[\text{PIRE}]_{\text{dBW}} = 74.53 - 1 \text{ [dB]}$$

$$\mathbf{[\text{PIRE}]_{\text{ETx}} = 73.53 \text{ [dBW]}}$$

3.- Pérdidas en el espacio libre, por lluvia y por absorción atmosférica, para calcular la atenuación total:

Para el espacio libre:

$$[L_{\text{e.l.}}]_{\text{dB}} = 20 \log r + 20 \log f + 92.44$$

$r$  = rango (S) en Km

$f$  = frecuencia en GHz

$$[L_{\text{e.l.}}]_{\text{dB}} = 20 \log(36537.776) + 20 \log(14.3) + 92.44$$

$$\mathbf{L_{\text{e.l.}} = 206.8 \text{ [dB]}}$$

Atenuación por lluvia:

De los márgenes de lluvia proporcionados por Satmex (anexo 5.1.2) localizamos la región donde se encuentra la Ciudad de México para una disponibilidad de 99.9% De acuerdo a la región Centro para transmisión tenemos que:

$$\mathbf{L_{\text{lluvia}} = 6.3 \text{ [dB]}}$$

Para la atenuación por absorción atmosférica:

$$[L_{\text{a.a.}}]_{\text{dB}} = [L_{\text{cenit}}]_{\text{dB}} \text{ cosec} \theta$$

Donde según la gráfica (anexo 5.1.1) para 14.3 [GHz]  $[L_{\text{cenit}}]_{\text{dB}} = 0.07$  y  $\theta = 59.61$  entonces :

$$[L_{\text{a.a.}}]_{\text{dB}} = (0.07) \text{ cosec}(59.61)$$

$$\mathbf{L_{\text{a.a.}} = 0.08 \cong 0.1 \text{ [dB]}}$$

Finalmente se calcula la atenuación total o atenuación de propagación:

$$L_{\text{propagación}} = L_{\text{e.l.}} + L_{\text{a.a.}} + L_{\text{lluvia}}$$

$$L_{\text{propagación}} = 206.8 + 0.1 + 6.3 \text{ [dB]}$$

$$L_{\text{propagación}} = 213.2 \text{ [dB]}$$

4.- Figura de Mérito del Satélite

De acuerdo con las especificaciones del Satmex 5 (anexo 5.1.3) tenemos que la Figura de mérito para la banda Ku-1 en la Cd. de Washington es:

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{satélite}} = +4.7 \text{ [dB/K]}$$

5.- Relación Portadora - Densidad de Ruido de Subida

Se obtiene mediante la fórmula:

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{subida}} = [ \text{PIRE}_{\text{Est.Terrena}} ]_{\text{dBW}} - [ L_{\text{propagación}} ]_{\text{dB}} + \left(\frac{G}{T}\right)_{\text{satélite}} ]_{\text{dB/K}} - [ 10 \log k ]_{\text{dBHz}}$$

Sustituyendo los valores:

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{subida}} = 73.53 - 213.2 + 4.7 + 228.6$$

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{subida}} = 93.83 \text{ [dB]}$$

6.- Relación Señal – Ruido

Si se tiene una tasa de transmisión de 64 kbps, se realiza el cálculo del ancho de banda requerido para un sistema QPSK:

$$B = R_b / 2$$

$$B = 64\text{kbps} / 2$$

$$B = 32 \text{ [kHz]}$$

Con este valor se determina la razón señal a ruido de la portadora, como se muestra:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{subida}} = \left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{subida}} - B \text{ [dB]}$$

Entonces:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{subida}} = 93.83 - 10\log(32 \times 10^3)$$

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{subida}} = 48.77 \text{ [dB]}$$

7.- Densidad de Flujo de Saturación

Se obtiene por medio de:

$$\phi = [ \text{PIRE} ]_{\text{dBW}} - [L_{e.l.}]_{\text{dB}} + [10 \log (4\pi / \lambda^2)]_{\text{dB/m}^2}$$

$$\phi = 73.53 - 206.8 + 10 \log (4\pi / (0.02098)^2)$$

$$\phi = -88.71 \text{ [dBW/m}^2\text{]}$$

*Enlace de Bajada*

1.- Se debe corregir el ángulo de elevación, el azimut y el rango según se explicó anteriormente como sigue:

$\Delta L = | \text{Longitud del satélite} - \text{Longitud de la estación terrena} |$

$$\Delta L = | 116.8^\circ - 77.02^\circ | = 39.78^\circ$$

$\perp =$  Latitud de la estación terrena

$$\phi' = \text{angtan} [ \tan \Delta L / \text{sen } \perp ]$$

$$\phi' = \text{angtan} [ \tan (39.78) / \text{sen} (38.9) ]$$

$$\phi' = 52.97^\circ$$

Debido a que la estación terrena se encuentra situada en el hemisferio Norte y al Este del satélite utilizamos la siguiente fórmula para obtener el ángulo real del azimut:

$$\begin{aligned} \phi &= 180^\circ + \phi' \\ \phi &= 180^\circ + 52.97^\circ \\ \phi &= \mathbf{232.974^\circ} \end{aligned}$$

Ahora para el cálculo del ángulo de elevación:

$$\theta = \arctan \left[ \frac{c - (Re/h)}{\sin \theta'} \right]$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{\cos(38.9)\cos(39.78) - 0.15127}{\sin[\arccos(\cos 38.9 \cos 39.78)]} \right]$$

$$\theta = \mathbf{29.14^\circ}$$

Calculando el rango:

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

$$\begin{aligned} \theta' &= \arccos[\cos \perp \cos \Delta L] \\ \theta' &= \arccos[\cos(38.9)\cos(39.78)] \\ \theta' &= 53.26 \end{aligned}$$

$$S = 35\,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos(25.898)}$$

$$\mathbf{S = 38\,688.023 [Km]}$$

2.-Pérdidas en el espacio libre, por lluvia y por absorción atmosférica, para calcular la atenuación total:

Para el espacio libre:

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 20 \log r + 20 \log f + 92.44$$

r = rango (S) en Km  
F = frecuencia en GHz

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 20 \log (38688.023) + 20 \log (12) + 92.44$$

$$\mathbf{L_{e.l.} = 205.7 [dB]}$$

Atenuación por lluvia:

De los márgenes de lluvia proporcionados por Satmex (anexo5.1.2) localizamos la región donde se encuentra la Ciudad de Washington para una disponibilidad de 99.9% De acuerdo a la región D3 para recepción tenemos que:

$$\mathbf{L_{lluvia} = 4.08 [dB]}$$

Para la atenuación por absorción atmosférica:

$$[L_{a.a}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \operatorname{cosec} \theta$$

Donde según la gráfica (anexo5.1.1) para 12 [GHz]  $[L_{cenit}]_{dB} = 0.06$  y  $\theta = 29.14^\circ$  entonces :

$$[L_{a.a}]_{dB} = (0.06) \operatorname{cosec}(29.14)$$

$$\mathbf{L_{a.a} = 0.12 [dB]}$$

Finalmente se calcula la atenuación total o atenuación de propagación:

$$L_{propagación} = L_{e.l.} + L_{a.a} + L_{lluvia}$$

$$L_{propagación} = 205.7 + 4.08 + 0.12 [dB]$$

$$\mathbf{L_{propagación} = 210 [dB]}$$

3.- Calculamos el PIRE y la ganancia del satélite:

El PIRE del satélite según las especificaciones de Satmex 5 (anexo 5.1.3):

$$[\text{PIRE}]_{\text{SAT}} = 51 \text{ [dBW]}$$

Y la potencia del transpondedor es de:

$$P_{\text{SAT}} = 132.5 \text{ [W]}$$

Calculando la  $G_{\text{SAT}}$  de:

$$G_{\text{SAT}} = [\text{PIRE}]_{\text{SAT}} - 10 \log (132.5)$$

$$G_{\text{SAT}} = 29.8 \text{ [dB]}$$

4.- Figura de mérito de la estación terrena receptora en Washington :

Calculando  $G_{\text{R}}$  para una eficiencia de 0.55 de:

$$G = \eta(\pi f D / c)^2$$

$$G_{\text{R}} = 0.55 (\pi (12000 \times 10^6 (3)) / 3 \times 10^8)^2$$

$$G_{\text{R}} = 138.96 \text{ [kW]}$$

$$G_{\text{R}} \text{ [dB]} = 10 \log (138.96 \times 10^3)$$

$$G_{\text{R}} = 48.93 \text{ [dB]}$$

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{R}} = G_{\text{R}} - L - 10 \log (T) \text{ [dB/K]}$$

Donde las pérdidas son  $L_{\text{conectores}} = 1 \text{ [dB]}$

$L_{\alpha} = 0.1 \text{ [dB]}$  .  $T = 295 \text{ K}$  Entonces:

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{R}} = 48.93 - 1 - 0.1 - 10 \log (295)$$

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{R}} = 23.13 \text{ [dB/K]}$$

### 5.- Relación Portadora - Densidad de Ruido de Bajada

Se obtiene mediante la fórmula:

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{bajada}} = [\text{PIRE}_{\text{SAT}}]_{\text{dBW}} - [L_{\text{propagación}}]_{\text{dB}} + \left(\frac{G}{T}\right)_{\text{R}} \text{ dB/K} - [10 \log k]_{\text{dBHz}}$$

Sustituyendo los valores:

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{bajada}} = 51 - 210 + 23.13 + 228.6$$

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{bajada}} = 92.73 \text{ [dB]}$$

### 6.- Relación Señal – Ruido

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{bajada}} = \left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{bajada}} - B \text{ [dB]}$$

Entonces:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{bajada}} = 92.73 - 10 \log (32 \times 10^3)$$

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{bajada}} = 47.67 \text{ [dB]}$$

### 7.- Densidad de Flujo de Saturación

Se obtiene por medio de:

$$\phi = [\text{PIRE}]_{\text{dBW}} - [L_{\text{e.l.}}]_{\text{dB}} + [10 \log (4\pi / \lambda^2)]_{\text{dB/m}^2}$$

$$\phi = 51 - 210 + 10 \log (4\pi / (0.025)^2)$$

$$\phi = -115.96 \text{ [dBW/m}^2\text{]}$$

8.- Por último se calcula la relación total de potencias por medio de:

$$1 / (C / N_0)_{total} = 1 / (C / N_0)_{subida} + 1 / (C / N_0)_i + 1 / (C / N_0)_{bajada}$$

De la figura 5.5 que muestra la gráfica de intermodulación obtenemos el valor de  $(C / N_0)_i$  de acuerdo al dato de IBO = 5 [dB] y para el caso de mayor número de portadoras, que en la gráfica observamos un total de 20 portadoras. Entonces:

$$(C / N_0)_i = 68 \text{ [dBHz]}$$

$$1 / (C / N_0)_{total} = 1 / [\text{antilog } (93.83/10)] + 1 / [\text{antilog } (92.73/10)] + 1 / [\text{antilog } (64/ 10)]$$

$$1 / (C / N_0)_{total} = 4.14 \times 10^{-10} + 5.33 \times 10^{-10} + 3.98 \times 10^{-7}$$

$$1 / (C / N_0)_{total} = 3.99 \times 10^{-7}$$

$$(C / N_0)_{total} = 2.5 \times 10^6$$

Entonces:

$$(C / N)_{total} = 10 \log (2.5 \times 10^6) - 10 \log (32 \times 10^3)$$

<b><math>(C / N)_{total} = 18.92 \text{ [dB]}</math></b>
--

Repetiremos el ejemplo pero ahora para el **Satmex 6** con Longitud 113° O y con las especificaciones técnicas del mismo que se irán señalando durante el desarrollo del ejercicio.

Solución

*Enlace de subida*

1.- Se debe corregir el ángulo de elevación, el azimut y el rango según se explicó anteriormente como sigue:

$$\Delta L = | \text{Longitud del satélite} - \text{Longitud de la estación terrena} |$$

$$\Delta L = | 113^\circ - 99.4^\circ | = 13.6^\circ$$

$$\perp = \text{Latitud de la estación terrena}$$

$$\begin{aligned} \phi' &= \text{angtan} [ \tan \Delta L / \text{sen } \perp ] \\ \phi' &= \text{angtan} [ \tan (13.6) / \text{sen} (19.15) ] \\ \phi' &= 36.408^\circ \end{aligned}$$

Debido a que la estación terrena se encuentra situada en el hemisferio Norte y al Este del satélite utilizamos la siguiente fórmula para obtener el ángulo real del azimut:

$$\begin{aligned} \phi &= 180^\circ + \phi' \\ \phi &= 180^\circ + 36.408^\circ \\ \phi &= 216.5^\circ \end{aligned}$$

Ahora para el cálculo del ángulo de elevación:

$$\begin{aligned} \theta &= \text{angtan} [ \frac{c - (Re/h)}{\text{sen} \theta'} ] \\ \theta &= \text{tan}^{-1} [ \frac{\cos(19.4) \cos(3.6) - 0.15127}{\text{sen}[\text{ang } \cos(\cos 19.4 \cos 13.6)]} ] \end{aligned}$$

$$\theta = 62.28^\circ$$

Calculando el rango:

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

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

$$\theta' = \arccos[\cos(19.4) \cos(13.6)]$$

$$\theta' = 23.54^\circ$$

$$S = 35\,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos(23.54)}$$

$$S = 36\,412.6827 \text{ [Km]}$$

2.- Calculamos el PIRE de la estación terrena transmisora de acuerdo a:

$$\text{PIRE} = P_T G_T$$

Donde:

$$P_T = 400 \text{ [W]}$$

Y  $G_T$  para una eficiencia de 0.55 se obtiene de:

$$G = \eta(\pi f D / c)^2$$

$$G_T = 0.55 (\pi (14300 \times 10^6 (2.4))) / 3 \times 10^8)^2$$

$$G_T = 71.04 \text{ [kW]}$$

$$G_T \text{ [dB]} = 10 \log(71.04)$$

$$G_T = 48.51 \text{ [dB]}$$

Entonces el PIRE:

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

$$[\text{PIRE}]_{\text{dBW}} = 10 \log(400) + 48.51$$

$$[\text{PIRE}]_{\text{E.Tx}} = 74.53 \text{ [dBW]}$$

A este resultado se le restan las pérdidas en los conectores  $L_{\text{conect}} = 1 \text{ [dB]}$  y en el amplificador de alta potencia :

Entonces el PIRE queda:

$$[\text{PIRE}]_{\text{dBW}} = 74.53 - 1 \text{ [dB]}$$

$$[\text{PIRE}]_{\text{ETx}} = 73.53 \text{ [dBW]}$$

3.- Pérdidas en el espacio libre, por lluvia y por absorción atmosférica, para calcular la atenuación total:

Para el espacio libre:

$$[L_{\text{e.l.}}]_{\text{dB}} = 20 \log r + 20 \log f + 92.44$$

$r$  = rango (S) en Km

$f$  = frecuencia en GHz

$$[L_{\text{e.l.}}]_{\text{dB}} = 20 \log(36412.6827) + 20 \log(14.3) + 92.44$$

$$L_{\text{e.l.}} = 206.7 \text{ [dB]}$$

Atenuación por lluvia:

De los márgenes de lluvia proporcionados por Satmex (anexo5.1.2) localizamos la región donde se encuentra la Ciudad de México para una disponibilidad de 99.9% De acuerdo a la región Centro para transmisión tenemos que:

$$L_{\text{lluvia}} = 6.3 \text{ [dB]}$$

Para la atenuación por absorción atmosférica:

$$[L_{\text{a.a.}}]_{\text{dB}} = [L_{\text{cetit}}]_{\text{dB}} \text{ cosec} \theta$$

Donde según la gráfica (anexo5.1.1) para 14.3 [GHz]  $[L_{\text{cetit}}]_{\text{dB}} = 0.07$  y  $\theta = 66.82$  entonces :

$$[L_{\text{a.a.}}]_{\text{dB}} = (0.07) \text{ cosec}(66.82)$$

$$L_{\text{a.a.}} = 0.076 \cong 0.1 \text{ [dB]}$$

Finalmente se calcula la atenuación total o atenuación de propagación:

$$L_{\text{propagación}} = L_{e.l} + L_{a.a} + L_{\text{lluvia}}$$

$$L_{\text{propagación}} = 206.7 + 0.1 + 6.3 \text{ [dB]}$$

$$L_{\text{propagación}} = \mathbf{213.1 \text{ [dB]}}$$

#### 4.- Figura de Mérito del Satélite

De acuerdo con las especificaciones del Satmex 6 (anexo 5.1.4) tenemos que la Figura de mérito para la banda Ku-1 es:

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{satélite}} = \mathbf{6.2 \text{ [dB/K]}}$$

#### 5.- Relación Portadora - Densidad de Ruido de Subida

Se obtiene mediante la fórmula:

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{subida}} = [\text{PIRE}_{\text{Est.Terrena}}]_{\text{dBW}} - [L_{\text{propagación}}]_{\text{dB}} + \left(\frac{G}{T}\right)_{\text{satélite}}_{\text{dB/K}} - [10 \log k]_{\text{dBHz}}$$

Sustituyendo los valores:

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{subida}} = 73.53 - 213.1 + 6.2 + 228.6$$

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{subida}} = \mathbf{95.23 \text{ [dB]}}$$

#### 6.- Relación Señal – Ruido

Si se tiene una tasa de transmisión de 64 kbps, se realiza el cálculo del ancho de banda requerido para un sistema QPSK:

$$B = R_b / 2$$

$$B = 64 \text{ kbps} / 2$$

$$B = \mathbf{32 \text{ [kHz]}}$$

Con este valor se determina la razón señal a ruido de la portadora, como se muestra:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{subida}} = \left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{subida}} - B \text{ [dB]}$$

Entonces:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{subida}} = 95.23 - 10 \log (32 \times 10^3)$$

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{subida}} = \mathbf{50.17 \text{ [dB]}}$$

#### 7.- Densidad de Flujo de Saturación

Se obtiene por medio de:

$$\phi = [\text{PIRE}]_{\text{dBW}} - [L_{e.l.}]_{\text{dB}} + [10 \log (4\pi / \lambda^2)]_{\text{dB/m}^2}$$

$$\phi = 73.53 - 206.7 + 10 \log (4\pi / (0.02098)^2)$$

$$\phi = \mathbf{-88.61 \text{ dBW/m}^2}$$

#### Enlace de Bajada

1.- Se debe corregir el ángulo de elevación, el azimut y el rango según se explicó anteriormente como sigue:

$\Delta L = | \text{Longitud del satélite} - \text{Longitud de la estación terrena} |$

$$\Delta L = | 113^\circ - 77.02^\circ | = 35.98^\circ$$

$\perp =$  Latitud de la estación terrena

$$\begin{aligned} \phi' &= \text{angtan} [ \tan \Delta L / \text{sen } \perp ] \\ \phi' &= \text{angtan} [ \tan (35.98) / \text{sen} (38.9) ] \\ \phi' &= 49.14^\circ \end{aligned}$$

Debido a que la estación terrena se encuentra situada en el hemisferio Norte y al Este del satélite utilizamos la siguiente fórmula para obtener el ángulo real del azimut:

$$\begin{aligned} \phi &= 180^\circ + \phi' \\ \phi &= 180^\circ + 49.14^\circ \\ \phi &= \mathbf{229.1417^\circ} \end{aligned}$$

Ahora para el cálculo del ángulo de elevación:

$$\begin{aligned} \theta &= \text{angtan} [ \frac{c - (Re/h)}{\text{sen } \theta'} ] \\ \theta &= \tan^{-1} [ \frac{\cos(38.9)\cos(25.98) - 0.15127}{\text{sen}[\text{ang } \cos(\cos 38.9 \cos 35.98)]} ] \\ \theta &= \mathbf{31.63^\circ} \end{aligned}$$

Calculando el rango:

$$\begin{aligned} S &= 35\,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos \theta'} \\ \theta' &= \text{angcos}[\cos \perp \cos \Delta L] \\ \theta' &= \text{angcos}[\cos (38.9)\cos(35.98)] \\ \theta' &= 50.96^\circ \\ S &= 35\,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos(50.96)} \end{aligned}$$

$$\mathbf{S = 38467.0672 [Km]}$$

2.-Pérdidas en el espacio libre, por lluvia y por absorción atmosférica, para calcular la atenuación total:

Para el espacio libre:

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 20 \log r + 20 \log f + 92.44$$

r = rango (S) en Km

F = frecuencia en GHz

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 20 \log (37975.9816) + 20 \log (12) + 92.44$$

$$\mathbf{L_{e.l.} = 205.7 [dB]}$$

Atenuación por lluvia:

De los márgenes de lluvia proporcionados por Satmex (anexo5.1.2) localizamos la región donde se encuentra la Ciudad de Washington para una disponibilidad de 99.9% De acuerdo a la región D3 para recepción tenemos que:

$$\mathbf{L_{lluvia} = 4.08 [dB]}$$

Para la atenuación por absorción atmosférica:

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \text{ cosec } \theta$$

Donde según la gráfica (anexo5.1.1) para 12 [GHz]  $[L_{cenit}]_{dB} = 0.06$  y  $\theta = 37.5^\circ$  entonces :

$$[L_{a.a.}]_{dB} = (0.06) \text{ cosec}(37.5)$$

$$\mathbf{L_{a.a} = 0.1 [dB]}$$

Finalmente se calcula la atenuación total o atenuación de propagación:

$$L_{\text{propagación}} = L_{e.l} + L_{a.a} + L_{\text{lluvia}}$$

$$L_{\text{propagación}} = 205.7 + 4.08 + 0.1 \text{ [dB]}$$

$$L_{\text{propagación}} = \mathbf{210 \text{ [dB]}}$$

3.- Calculamos el PIRE y la ganancia del satélite:

El PIRE del satélite según la huella que pasa por la región en estudio es de:

$$[\text{PIRE}]_{\text{SAT}} = \mathbf{53 \text{ [dBW]}}$$

Y la potencia del transpondedor es de:

$$P_{\text{SAT}} = \mathbf{150 \text{ [W]}}$$

Calculando la  $G_{\text{SAT}}$  de:

$$G_{\text{SAT}} = [\text{PIRE}]_{\text{SAT}} - 10 \log (132.5)$$

$$G_{\text{SAT}} = \mathbf{31.23 \text{ [dB]}}$$

4.- Figura de mérito de la Estación terrena receptora en Washington :

Calculando  $G_R$  para una eficiencia de 0.55 de:

$$G = \eta(\pi f D / c)^2$$

$$G_R = 0.55 (\pi (12000 \times 10^6 (3)) / 3 \times 10^8)^2$$

$$G_R = 138.96 \text{ [kW]}$$

$$G_R \text{ [dB]} = 10 \log (138.96 \times 10^3)$$

$$G_R = \mathbf{48.93 \text{ [dB]}}$$

$$\left(\frac{G}{T}\right)_R = G_R - L - 10 \log (T) \text{ [dB/K]}$$

Donde las pérdidas L son  $L_{\text{conect}} = 1 \text{ [dB]}$   
 $L_{\alpha} = 0.1 \text{ [dB]}$  .  $T = 295 \text{ K}$  Entonces:

$$\left(\frac{G}{T}\right)_R = 48.93 - 1 - 0.1 - 10 \log (295)$$

$$\left(\frac{G}{T}\right)_R = \mathbf{23.13 \text{ [dB/K]}}$$

5.- Relación Portadora - Densidad de Ruido de Bajada

Se obtiene mediante la fórmula:

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{bajada}} = [\text{PIRE}_{\text{SAT}}]_{\text{dBW}} - [$$

$$L_{\text{propagación}}]_{\text{dB}} + \left(\frac{G}{T}\right)_R \text{ dB/K} - [10 \log k]_{\text{dBHz}}$$

Sustituyendo los valores:

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{bajada}} = 53 - 210 + 23.13 + 228.6$$

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{bajada}} = \mathbf{94.73 \text{ [dB]}}$$

6.- Relación Señal – Ruido

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{bajada}} = \left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{bajada}} - B \text{ [dB]}$$

Entonces:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{bajada}} = 94.73 - 10 \log (32 \times 10^3)$$

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{bajada}} = \mathbf{49.67 \text{ [dB]}}$$

7.- Densidad de Flujo de Saturación

Se obtiene por medio de:

$$\phi = [\text{PIRE}]_{\text{dBW}} - [L_{e.l.}]_{\text{dB}} + [10 \log (4\pi / \lambda^2)]_{\text{dB/m}^2}$$

$$\phi = 53 - 210 + 10 \log (4\pi / (0.025)^2)$$

$$\phi = -113.96 \text{ [dBW/m}^2\text{]}$$

$(C/N_0)_i$  de acuerdo al dato de IBO = -3 [dB] y para el caso de mayor número de portadoras, que en la gráfica observamos un total de 20 portadoras. Entonces:

8.- Por último se calcula la relación total de potencias por medio de:

$$(C/N_0)_i = 64 \text{ [dBHz]}$$

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

$$1 / (C/N_0)_{\text{total}} = 1 / [\text{antilog}(95.23/10)] + 1 / [\text{antilog}(94.73/10)] + 1 / [\text{antilog}(68/10)]$$

De la figura 5.5 que muestra la gráfica de intermodulación obtenemos el valor de

$$1 / (C/N_0)_{\text{total}} = 2.99 \times 10^{-10} + 3.36 \times 10^{-10} + 1.58 \times 10^{-7}$$

$$1 / (C/N_0)_{\text{total}} = 1.59 \times 10^{-7}$$

$$(C/N_0)_{\text{total}} = 6.28 \times 10^6$$

$$(C/N_0)_{\text{total}} = 10 \log(6.28 \times 10^6) - 10 \log(32 \times 10^3)$$

$$(C/N)_{\text{total}} = 22.93 \text{ [dB]}$$

### EJEMPLO 2

Utilizando los datos del Ejercicio 1 para el enlace de subida, calcular el diámetro de las antenas que deben tener las estaciones terrenas si usan un transpondedor completo del satélite Satmex 5 cuya densidad de flujo de saturación en banda Ku-1  $\psi = -93$  (dBW/m<sup>2</sup>). Repetir para el Satmex 6 con  $\psi = -98$  (dBW/m<sup>2</sup>). Calcular para condiciones de cielo despejado y para condiciones de lluvia.

#### Solución

La densidad de flujo de saturación de cada satélite es proporcionado por el fabricante, ambas cifras son las que Hughes para Satmex 5 y Loral para Satmex 6 han especificado para ellos. Cuando la densidad de flujo de saturación es conocida podemos calcular el PIRE con el que debe transmitir una estación terrena para saturar el transpondedor. En el ejemplo por cuestiones prácticas, vamos a suponer que una sola estación terrena satura el transpondedor. Conociendo el PIRE y suponiendo una potencia de transmisión, podremos saber cuáles son las medidas de los diámetros de las antenas por medio de la ganancia.

*Para Satmex 5 y cielo despejado:*

1.- De acuerdo a la fórmula que involucra a la densidad de flujo de saturación :

$$\text{PIRE} = [\Psi]_{\text{dBW/m}^2} - 20 \log f + [L_{e.1.}]_{\text{dB}} - 21.45 \quad [\text{dBW}]$$

Sustituyendo:

$$\text{PIRE} = -93 - 20 \log (14.3) + 206.8 - 21.45$$

$$\text{PIRE} = \mathbf{69.24 \quad [\text{dBW}]}$$

Ahora, con la fórmula del PIRE:

$$\text{PIRE} = 10 \log (P_{\text{tx}}) + [G_{\text{tx}}]_{\text{dB}}$$

Despejamos para la ganancia:

$$[G_{\text{tx}}]_{\text{dB}} = \text{PIRE} - 10 \log (P_{\text{tx}})$$

De donde:

$$[G_{\text{tx}}]_{\text{dB}} = 69.24 - 10 \log (400)$$

$$[G_{\text{tx}}] = \mathbf{43.21 \quad [\text{dB}] = 20941.12 \quad [\text{W}]}$$

Con este valor, podemos conocer finalmente el valor del diámetro, entonces  $G_{\text{tx}}$  está en [W]:

$$D = (\lambda / \pi) * \sqrt{(G_{\text{tx}} / \eta)}$$

$$D = ((0.02097) / \pi) * \sqrt{(83946 / 0.55)}$$

$$\mathbf{D = 1.3 \quad [m]}$$

*Para Satmex 6 y cielo despejado:*

1.- De acuerdo a la fórmula que involucra a la densidad de flujo de saturación :

$$\text{PIRE} = [\Psi]_{\text{dBW/m}^2} - 20 \log f + [L_{e.1.}]_{\text{dB}} - 21.45 \quad [\text{dBW}]$$

Sustituyendo:

$$\text{PIRE} = -98 - 20 \log (14.3) + 206.7 - 21.45$$

$$\text{PIRE} = \mathbf{64.17 \quad [\text{dBW}]}$$

Ahora, con la fórmula del PIRE:

$$\text{PIRE} = 10 \log (P_{\text{tx}}) + [G_{\text{tx}}]_{\text{dB}}$$

Despejamos para la ganancia:

$$[G_{\text{tx}}]_{\text{dB}} = \text{PIRE} - 10 \log (P_{\text{tx}})$$

De donde:

$$[G_{\text{tx}}]_{\text{dB}} = 64.17 - 10 \log (400)$$

$$[G_{\text{tx}}] = \mathbf{38.14 \quad [\text{dB}] = 6516.28 \quad [\text{W}]}$$

Con este valor, podemos conocer finalmente el valor del diámetro, entonces  $G_{\text{tx}}$  está en [W]:

$$D = (\lambda / \pi) * \sqrt{(G_{\text{tx}} / \eta)}$$

$$D = ((0.02097) / \pi) * \sqrt{(6516.28 / 0.55)}$$

$$\mathbf{D = 0.726 \quad [m]}$$

*Para Satmex 5 y lluvia:*

Para realizar los cálculos en condiciones de lluvia, solo agregamos a la atenuación correspondiente del margen de lluvia correspondiente a la zona.

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 206.8 \text{ [dB]}$$

$$[L_{lluvia}]_{dB} = 6.3 \text{ [dB]}$$

$$\text{PIRE} = -93 - 20 \log(14.3) + 213.1 - 21.45$$

$$\text{PIRE} = 75.54 \text{ [dBW]}$$

Ahora, con la fórmula del PIRE:

$$\text{PIRE} = 10 \log(P_{tx}) + [G_{tx}]_{dB}$$

Despejamos para la ganancia:

$$[G_{tx}]_{dB} = \text{PIRE} - 10 \log(P_{tx})$$

De donde:

$$[G_{tx}]_{dB} = 75.54 - 10 \log(400)$$

$$[G_{tx}] = 49.51 \text{ [dB]} = 89524.10 \text{ [W]}$$

Con este valor, podemos conocer finalmente el valor del diámetro, entonces  $G_{tx}$  está en [W]:

$$D = (\lambda / \pi) * \sqrt{(G_{tx} / \eta)}$$

$$D = ((0.02097) / \pi) * \sqrt{(89524.10 / 0.55)}$$

$$\mathbf{D = 2.7 [m]}$$

*Para Satmex 6 y lluvia:*

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 206.8 \text{ [dB]}$$

$$[L_{lluvia}]_{dB} = 6.3 \text{ [dB]}$$

$$\text{PIRE} = -98 - 20 \log(14.3) + 213.1 - 21.45$$

$$\text{PIRE} = 70.54 \text{ [dBW]}$$

Ahora, con la fórmula del PIRE:

$$\text{PIRE} = 10 \log(P_{tx}) + [G_{tx}]_{dB}$$

Despejamos para la ganancia:

$$[G_{tx}]_{dB} = \text{PIRE} - 10 \log(P_{tx})$$

De donde:

$$[G_{tx}]_{dB} = 70.54 - 10 \log(400)$$

$$[G_{tx}] = 44.52 \text{ [dB]} = 28313.91 \text{ [W]}$$

Con este valor, podemos conocer finalmente el valor del diámetro, entonces  $G_{tx}$  está en [W]:

$$D = (\lambda / \pi) * \sqrt{(G_{tx} / \eta)}$$

$$D = ((0.02097) / \pi) * \sqrt{(28313.91 / 0.55)}$$

$$\mathbf{D = 1.51 [m]}$$

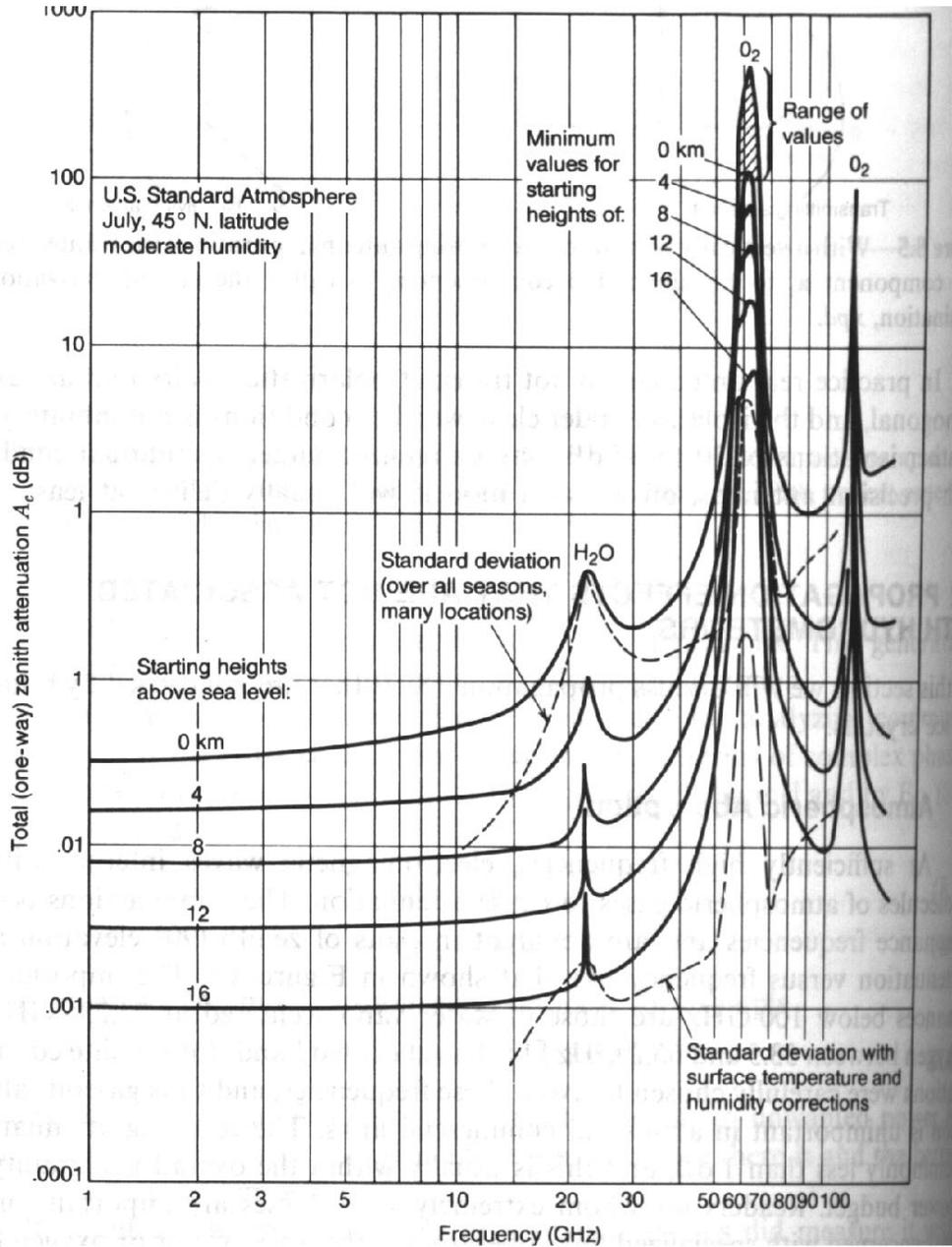
*Conclusión:*

Siendo el Satmex 6 más potente que el Satmex 5, se disminuye el diámetro de las antenas en más de un 50% (55.77%). También se nota que la haber condiciones de lluvia, los diámetros de las antenas aumentan con respecto a los que se obtienen con cielo despejado, sin perder por supuesto, el porcentaje antes mencionado entre ambos satélites. Cabe aclarar que los resultados obtenidos se deben a la suposición de que una sola portadora satura el transpondedor, por ello los diámetros exceden las medidas usadas actualmente en las antenas de las estaciones terrenas.



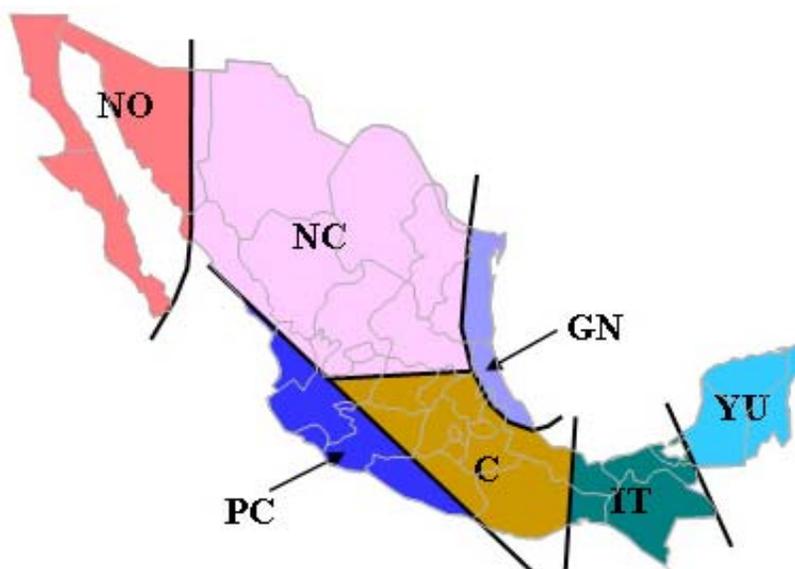
### ANEXO 5.1

#### 5.1.1 Gráfica de Atenuación por Absorción Atmosférica Total en dirección al cenit

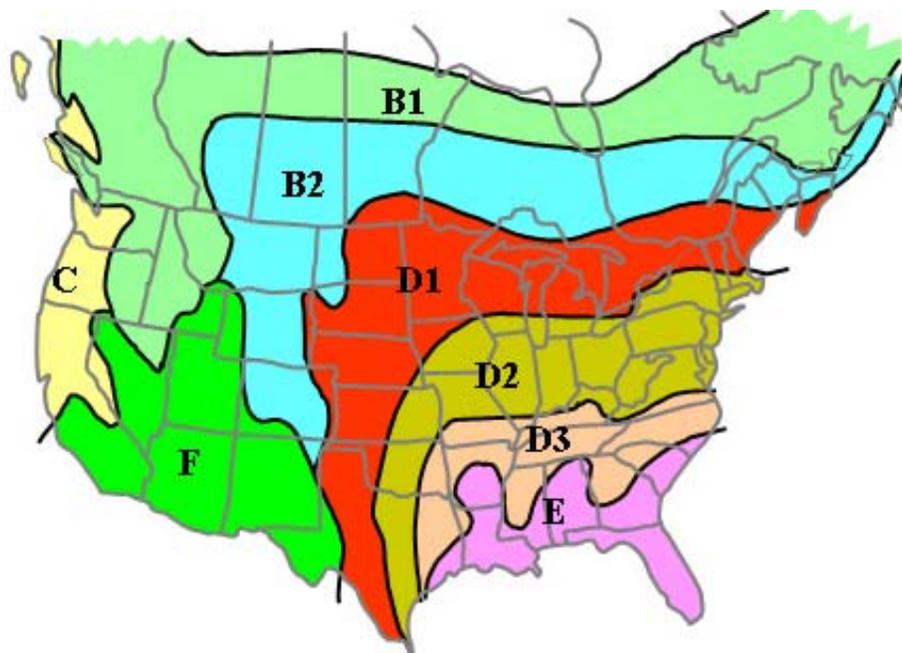


### 5.1.2 Márgenes de atenuación de lluvia por zona de cobertura de la flota satelital Satmex

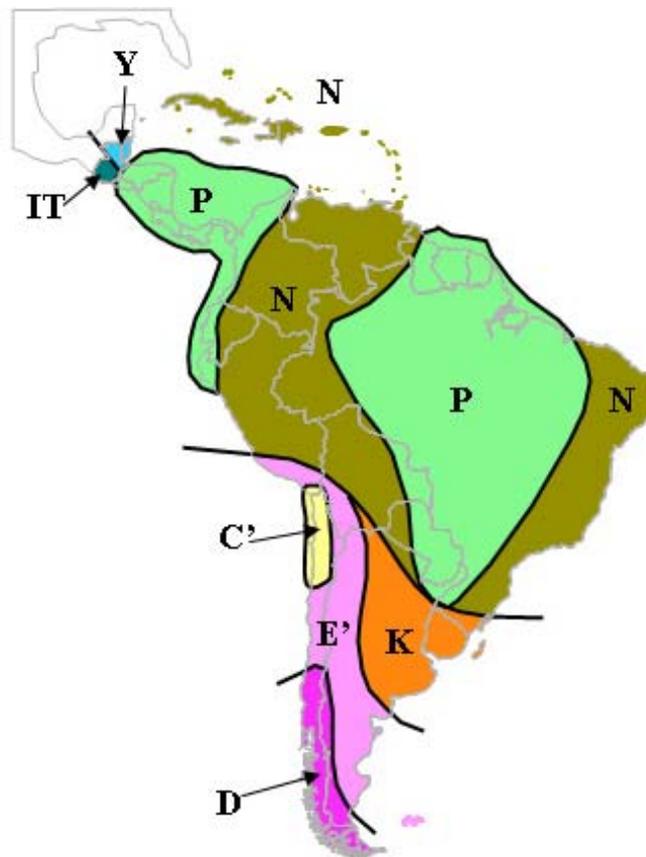
Zona Hidrometeorológica		Disponibilidad		
		99.50% (dB)	99.80% (dB)	99.90% (dB)
Nor Occidente	Tx	1.50	3.00	3.50
	Rx	0.00	1.00	1.50
Norte Centro	Tx	0.00	1.00	1.30
	Rx	0.00	0.00	0.00
Golfo Norte	Tx	3.60	6.80	9.20
	Rx	1.60	4.80	7.20
Centro	Tx	2.20	4.20	6.30
	Rx	0.20	2.20	4.30
Pacífico Centro	Tx	3.60	5.90	8.50
	Rx	1.60	3.90	6.50
Istmo	Tx	2.50	5.80	8.20
	Rx	0.50	3.80	6.20
Yucatán	Tx	2.90	6.00	8.90
	Rx	0.90	4.00	6.90



Zona Hidrometeorológica		Disponibilidad		
		99.50% (dB)	99.80% (dB)	99.90% (dB)
B1	Tx	0.14	0.29	0.46
	Rx	0.10	0.20	0.32
B2	Tx	0.21	0.40	0.65
	Rx	0.15	0.28	0.46
C	Tx	0.39	0.72	1.15
	Rx	0.27	0.51	0.81
D1	Tx	0.70	1.44	1.95
	Rx	0.49	1.02	1.39
D2	Tx	1.17	2.34	3.74
	Rx	0.83	1.66	2.67
D3	Tx	1.59	3.47	5.69
	Rx	1.12	2.48	4.08
E	Tx	2.10	5.66	9.79
	Rx	1.49	4.06	7.07
F	Tx	0.29	0.49	0.70
	Rx	0.20	0.34	0.50

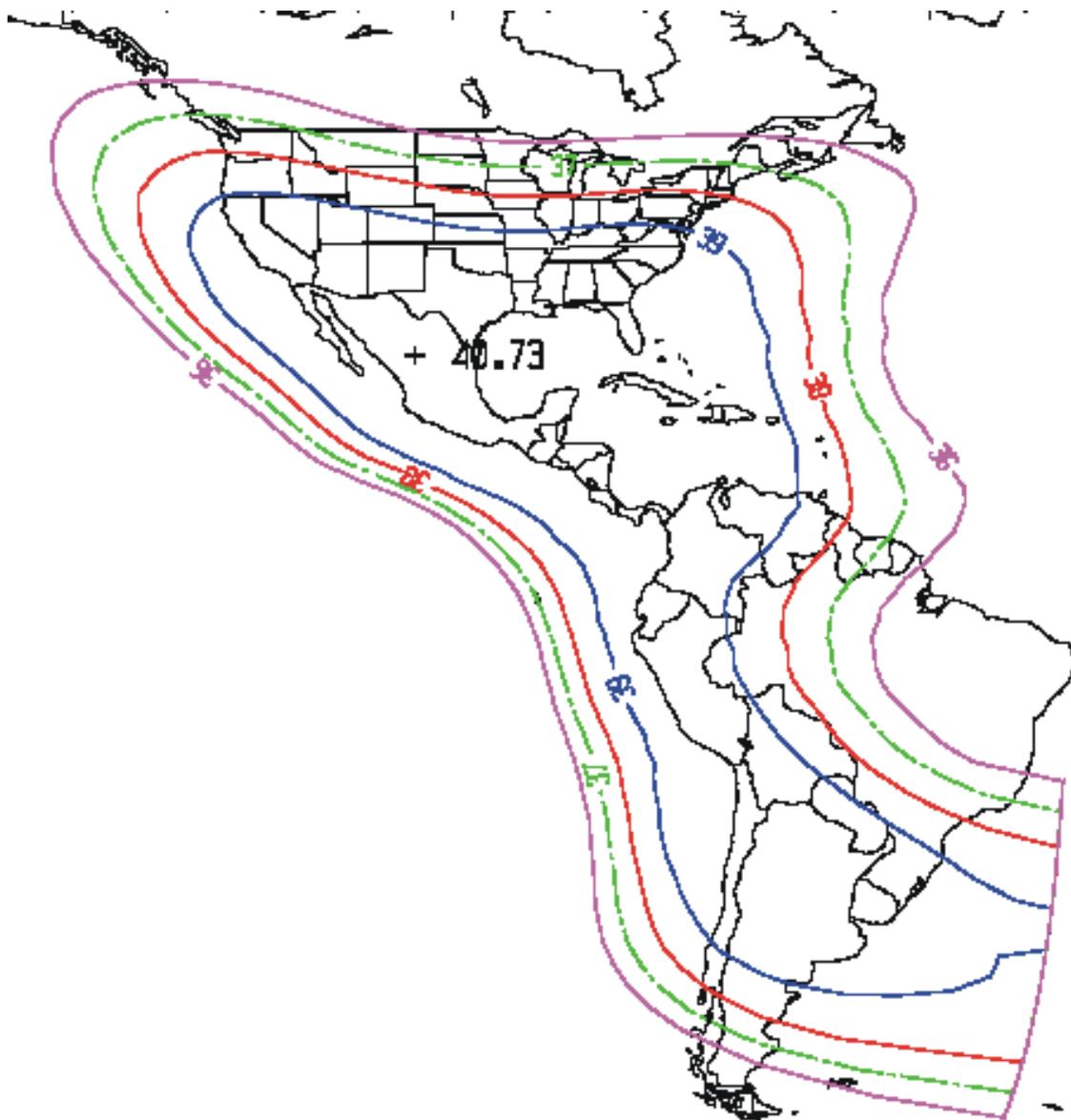


Zona Hidrometeorológica		Disponibilidad		
		99.50% (dB)	99.80% (dB)	99.90% (dB)
C'	Tx	0.15	0.48	0.66
	Rx	0.11	0.34	0.47
D	Tx	1.36	2.04	2.84
	Rx	0.95	1.44	2.02
IT	Tx	2.50	5.80	8.20
	Rx	0.50	3.80	6.20
E'	Tx	0.28	0.73	1.10
	Rx	0.19	0.51	0.77
K	Tx	2.37	4.06	6.14
	Rx	1.67	2.88	4.38
N	Tx	2.65	5.38	8.98
	Rx	1.89	3.86	6.48
P	Tx	6.73	11.37	17.25
	Rx	4.84	8.23	12.55
Y	Tx	2.90	6.00	8.90
	Rx	0.90	4.00	6.90

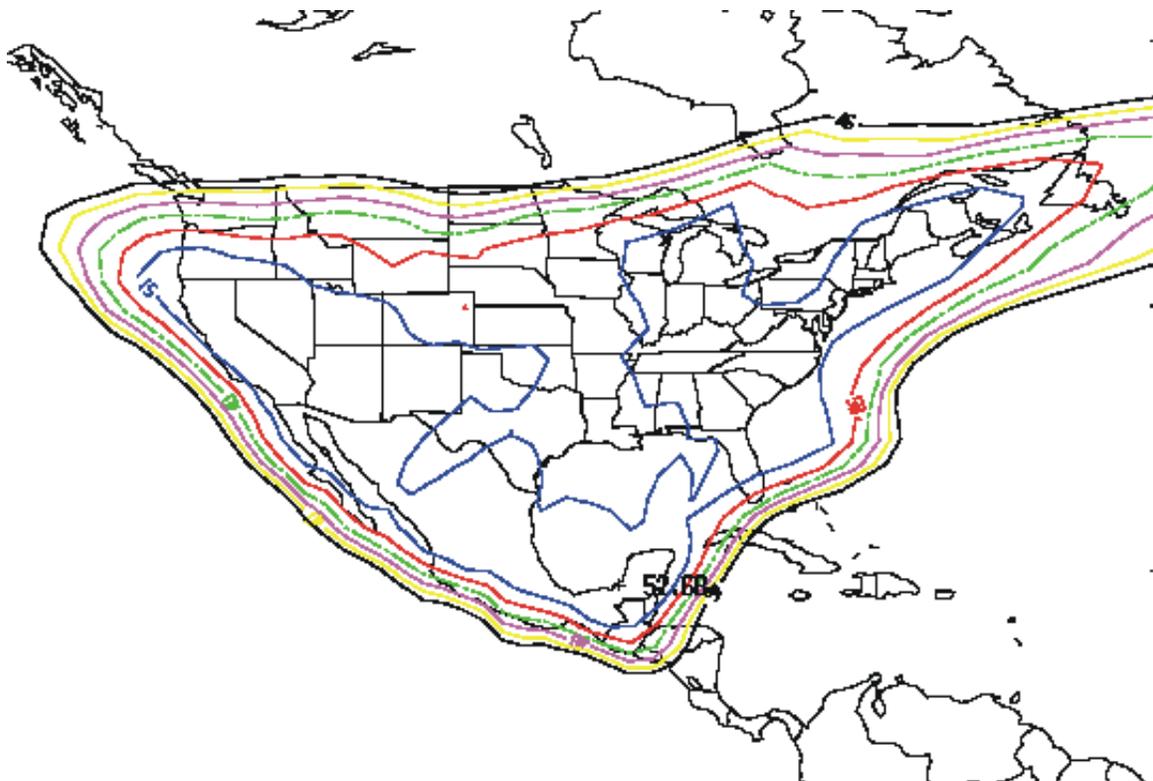


### 5.1.3 Huellas del PIRE de Satmex 5

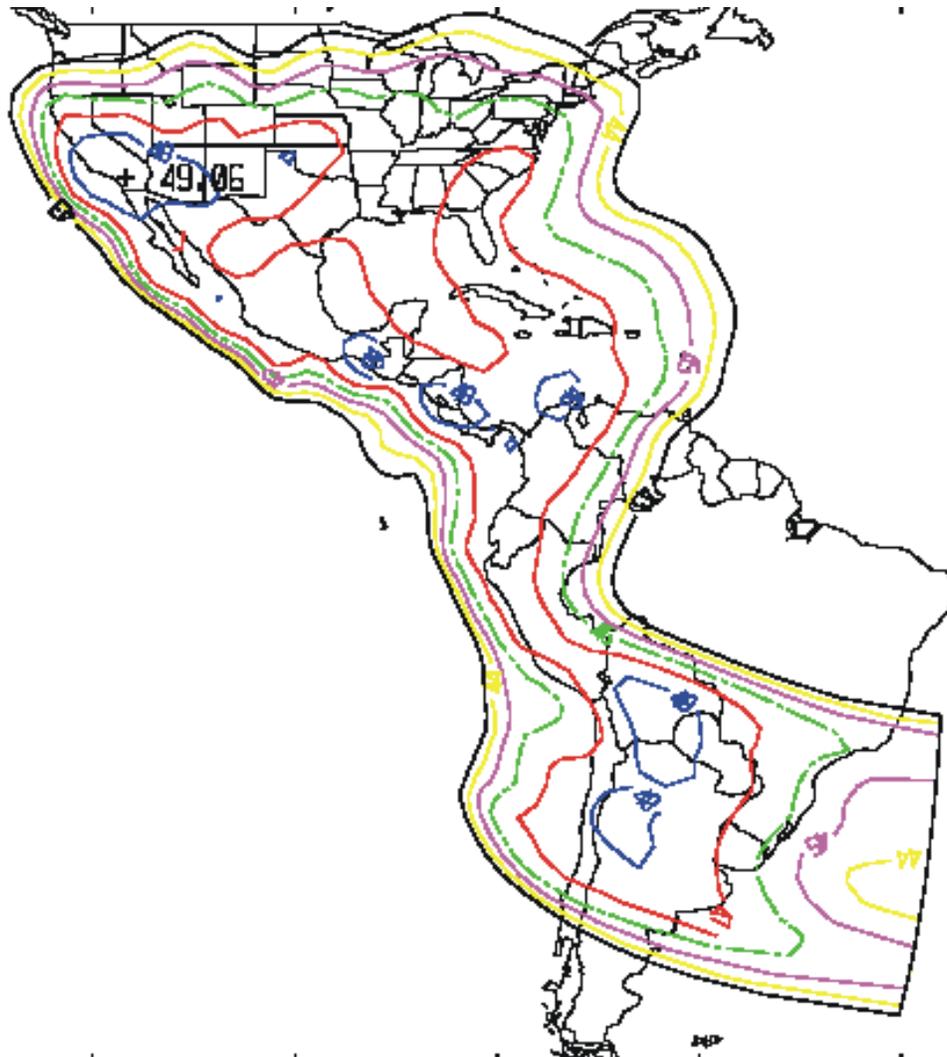
Banda C Polarización Hor/Ver



### Banda Ku-1 Polarización Ver/Hor

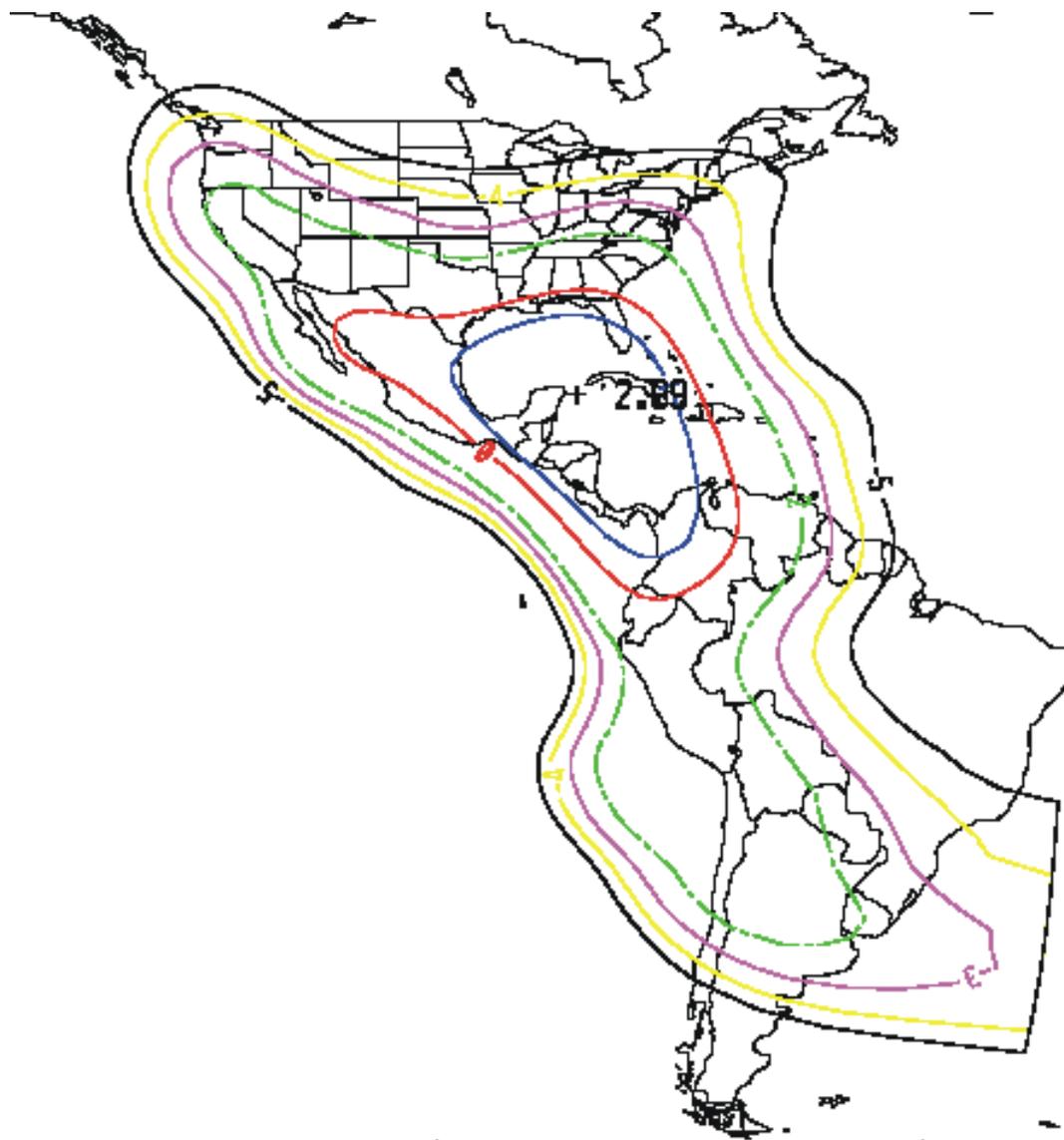


### Banda Ku-2 Polarización Ver/Hor

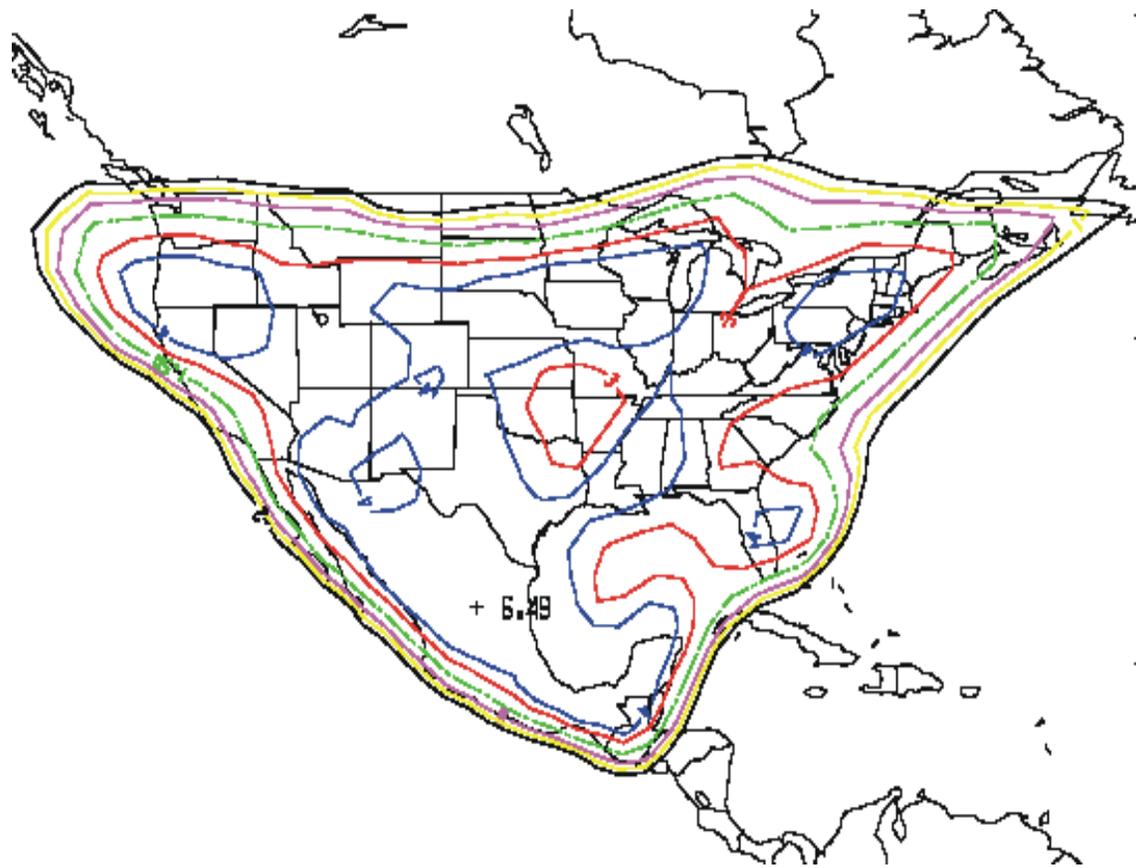


### 5.1.4 Huellas de G/T de Satmex 5

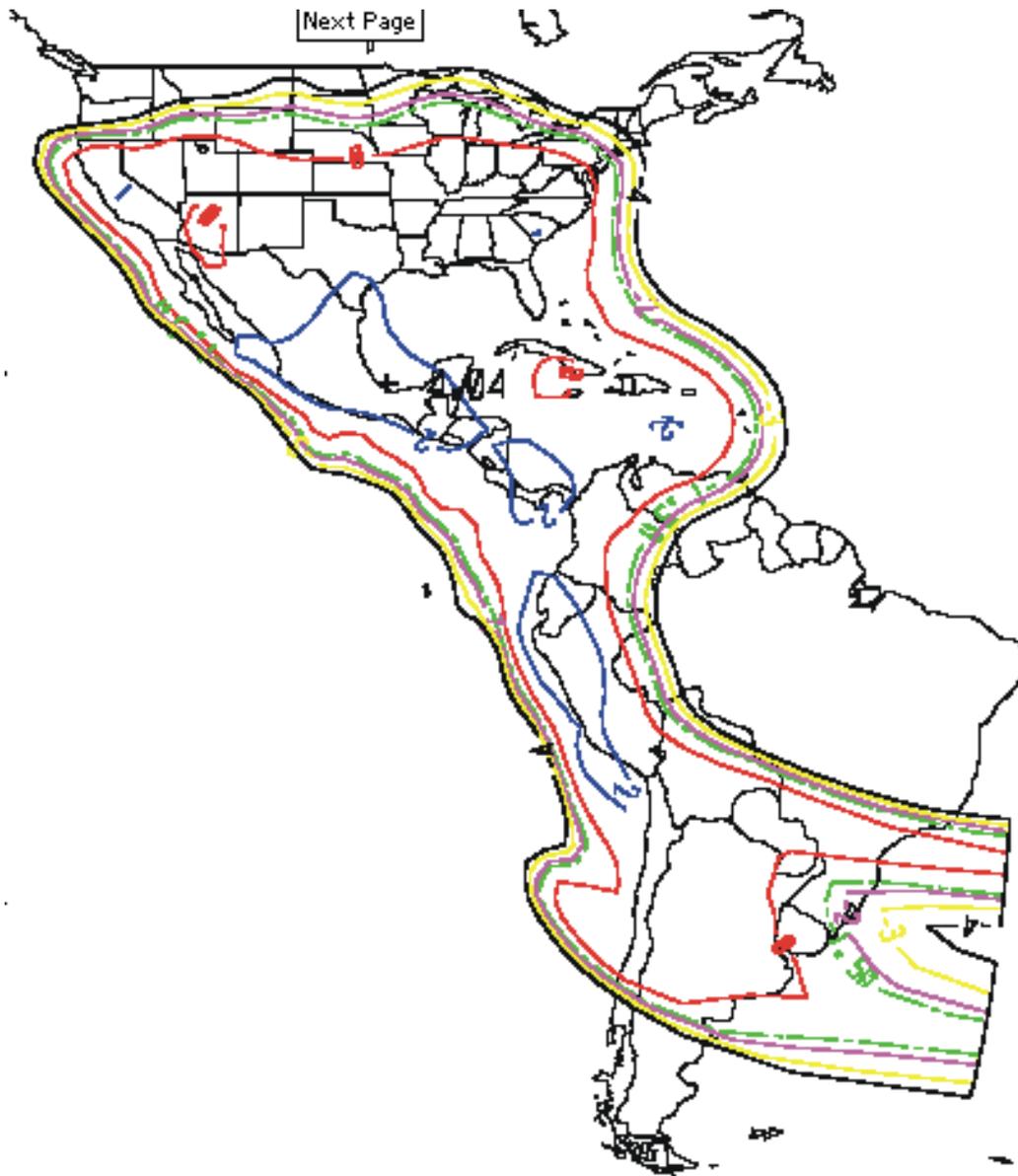
#### Banda C Polarización Hor/Ver



### Banda Ku-1 Polarización Ver/Hor

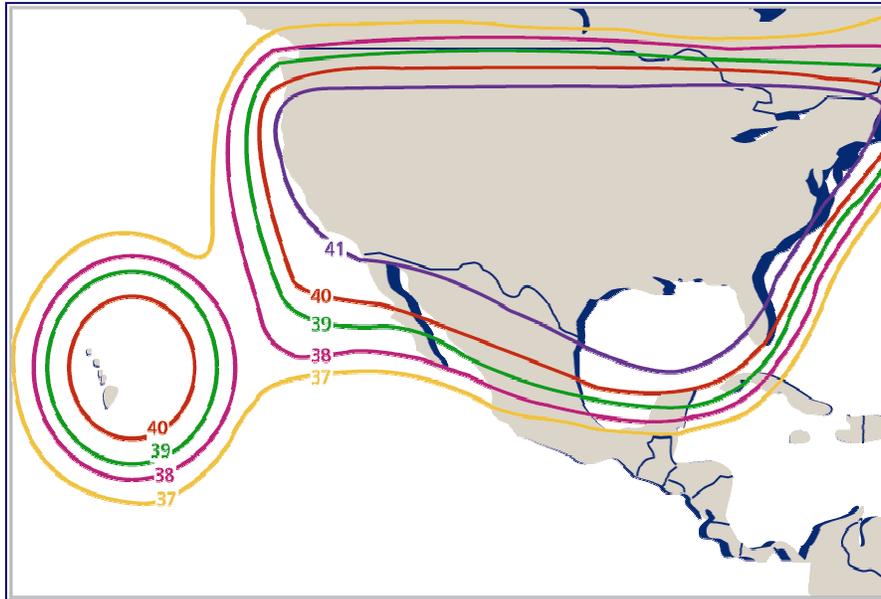


### Banda Ku-2 Polarización Ver/Hor

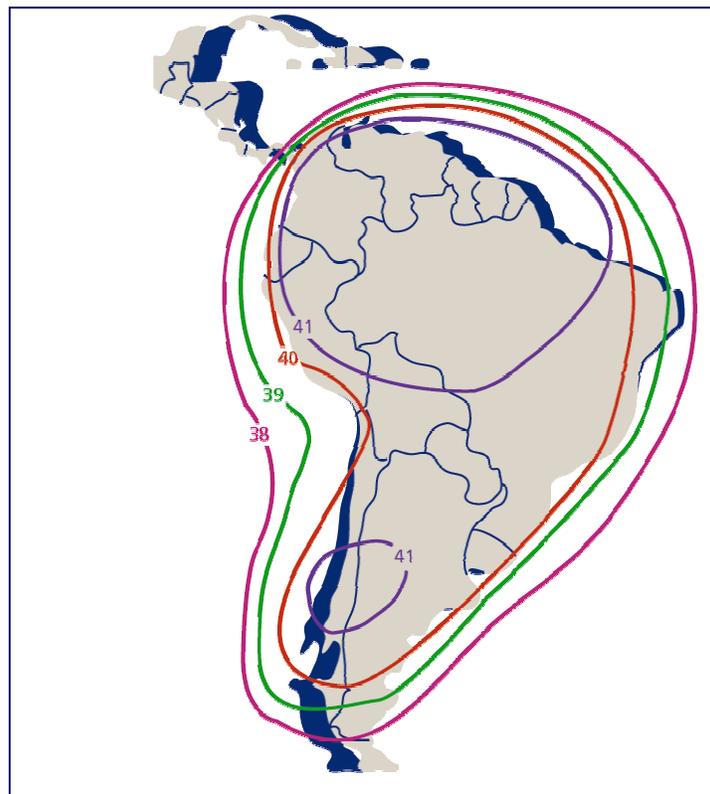


### 5.1.5 Huellas del PIRE para Satmex 6

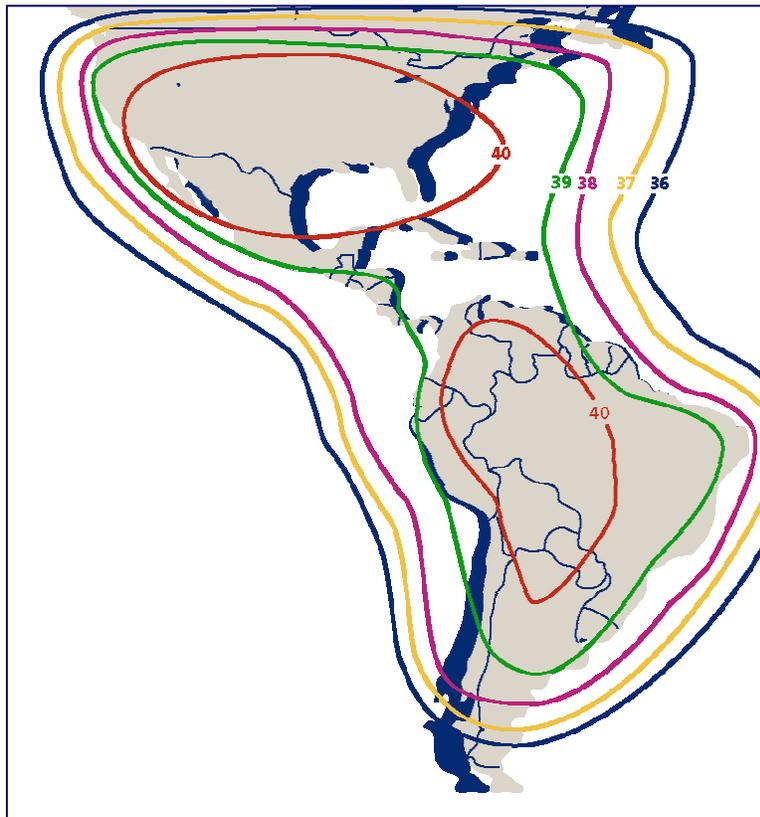
#### Banda C1



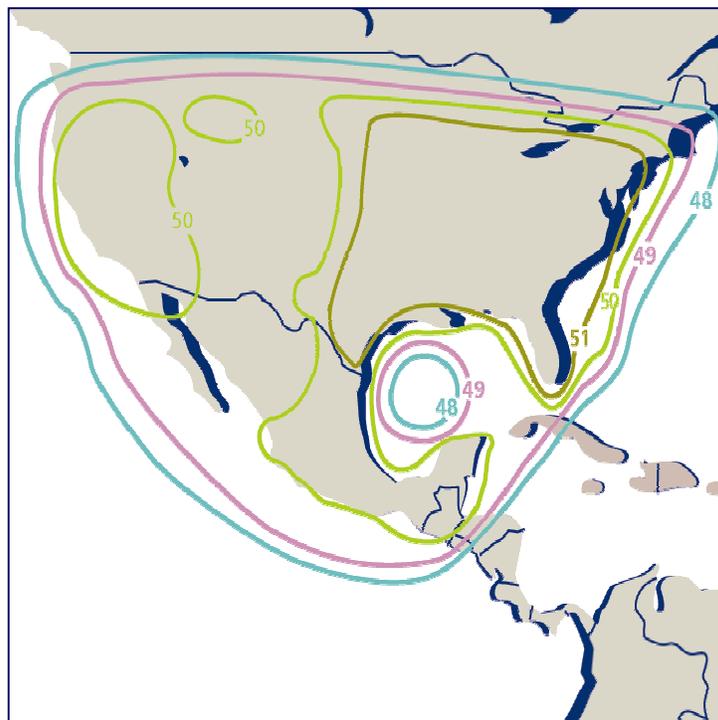
#### Banda C2 Sudamérica



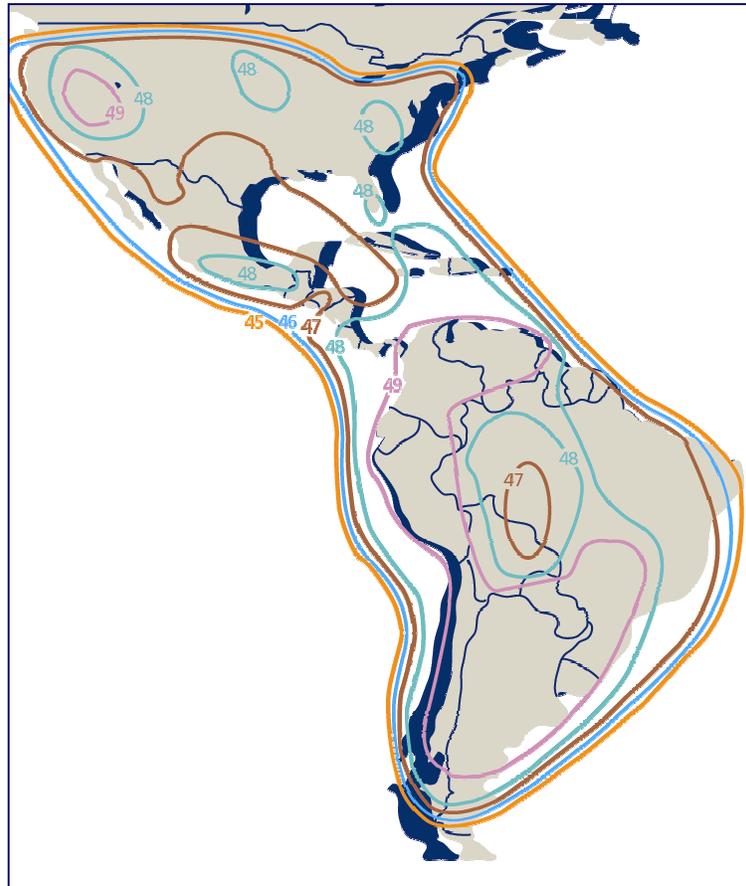
### Banda C3 Continental



### Banda Ku-1 NAFTA



### Banda Ku-2 Continental + haz regional en Sudamérica



## CAPÍTULO 6

### 6.1 Situación Económica de Satmex

Satmex es la empresa mexicana líder en América, que opera y presta servicios con un sistema satelital a través del cual ofrece servicios de radiodifusión, telefonía y telecomunicaciones a 32 países en la región. La flota de Satmex también apoya el desarrollo de las áreas rurales al ofrecer servicios de educación a distancia y de telefonía rural a localidades remotas. Además, con sus socios en la región NAFTA y el resto de América, Satmex proporciona conectividad de alta velocidad a Proveedores de Servicios de Internet (ISPs)\*\* y de Servicios de Radiodifusión Digital (DBS), con lo que contribuye a la integración de América Latina con el resto del continente. La cobertura geográfica de Satmex incluye los Estados Unidos, el Caribe, y toda América Latina excepto por ciertas regiones de Brasil. Esta cobertura tiene un alto potencial de crecimiento en el largo plazo, pero desfavorable en el corto plazo; después del lanzamiento de Satmex 6, mejorará el potencial de crecimiento de su área de cobertura. Actualmente la empresa tiene tres aparatos en órbita: el Morelos 2, que se usa sólo para investigación, el Solidaridad 2, y el Satmex 5, lanzado en 1998 y con huella regional.

Satmex es un importante activo para Loral Space & Communications, que tiene una participación económica y de voto de 49% en Satmex, y para el gobierno mexicano, propietario de una participación de 25% en la compañía.

Antes de su privatización el 90% de los ingresos de Satmex provenía de su servicio a clientes mexicanos. Desde su privatización en noviembre de 1997, Satmex ha llevado a cabo algunas mejoras notables, que incluyen la extensión del lapso promedio de sus contratos (66% de los contratos son de más de tres años, mientras que en noviembre de 1997 casi todos eran de menos de un año), y cambiar la mezcla de su base de clientes (de alrededor de 95% localizados en México al momento de su privatización, a aproximadamente 50% a marzo de 2002), además tiene presencia en más de 30 países y 60% de sus ingresos que en el pasado 2001 superaron los 100 millones de dólares, son generados por sus operaciones en el exterior, lo que hoy constituye una de las mayores fortalezas de la empresa ya que le permite diversificar sus ingresos. No es fácil competir con una flota de 3 satélites, frente a empresas como PanAmSat que tiene 11 satélites y una gran cantidad de espacio disponible, lo que le permite abaratar sus precios. Es por eso que Satmex se ha enfocado a mejorar su atención a clientes y una de sus grandes ventajas competitivas es que es la única empresa que puede ofrecer a los clientes la solución de sus problemas en México ya que cuenta con sus propios centros de servicio y con un equipo de técnicos altamente especializados. Satmex recaudó los ingresos del seguro de la pérdida de Solidaridad 1 en enero de 2001, ingresos que están en una cuenta de reserva, para financiar la construcción del poderoso satélite Satmex 6 y para financiar los intereses de las Notas Garantizadas a tasa variable de la compañía. El refinanciamiento del costo de Satmex 6 es clave en la estrategia general de la empresa para mejorar su perfil financiero.

---

\*\*Si bien se esperaba que los Servicios Satelitales Fijos como los de Satmex, se beneficiaran de las transmisiones de señales relacionadas con Internet, la evolución de este mercado es ahora incierta y menos prometedora.

Satmex, el gigante mexicano de servicios satelitales, golpeado por escasos ingresos y poca liquidez enfrentó un reto considerable al tratar de sustituir a su cliente más grande, Innova, en el entorno económicamente negativo del 2002. Aunque la importancia de este cliente y de su entidad relacionada Grupo Televisa S.A. disminuyó considerablemente con el tiempo, de representar 43% de las utilidades de Satmex en 1997 a 19% en 2001, también la pérdida de Sky que desde antes de la apertura ya tenía contratos con PanAmSat y que representaban por lo menos el 20% de la facturación aumentó la caída de los ingresos de Satmex, de esta forma su pérdida fue significativa y los malos resultados se reflejaron en el primer trimestre de 2002 de Satmex.

La desaceleración que inició hace unos años y la crisis regional cobraron su cuota. En el 2000 los ingresos de Satmex sumaron 136 millones de dólares pasando a 126 millones de dólares para el 2001 y dibujando una perspectiva de 100 millones de dólares para el 2002.

Esto aconteció en un momento en el que varios de los nuevos clientes de Satmex enfrentan problemas financieros y han cancelado sus contratos.

Atrapada en tiempos difíciles por la crisis de la industria satelital a nivel global, la empresa despidió en el 2002 a 21% de sus 221 empleados y redujo costos para cumplir con sus compromisos financieros.

Además, la cancelación de los contratos de algunos de los clientes, debido a la desaceleración económica, dificultará en el corto plazo la compensación por parte de la compañía de la pérdida de este cliente.

La deuda asegurada de Satmex trepa a 525 millones de dólares, 320 millones de dólares en bonos de alto rendimiento que vencen en el 2004 y 205 millones de dólares en notas garantizadas con tasa flotante que también vencen en el 2004.

Durante el 2002, la empresa estuvo buscando financiamiento con el Eximbank de Estados Unidos y con Coface una empresa francesa para financiar el lanzamiento del Satmex 6. En el 2002 Export-Import Bank de Estados Unidos se comprometió a prestarle a Satmex 150 millones de dólares, y la aseguradora de créditos para la exportación Coface le aprobó un crédito por 76 millones de dólares. Sin embargo, los préstamos están sujetos a que Satmex logre canjear sus bonos de deuda de 320 millones de dólares.

A pesar de esta situación, también se tienen expectativas optimistas: los fondos de los préstamos se van a utilizar para terminar de pagar la construcción de su nuevo satélite Satmex 6, los servicios de lanzamiento del aparato, y también para pagar el premio del canje de deuda. El Satmex 6 concentró las esperanzas de la empresa para superar el mal momento de la industria. El satélite ampliará la huella de Satmex desde Alaska hasta Tierra del Fuego y podría ayudar a impulsar los ingresos. Eso es algo clave para Satmex, que compite con PanAmSat e Intelsat en Latinoamérica. Satmex 6 es uno de los satélites más grandes del mundo y será fundamental por el crecimiento de Satmex y los ingresos que representará del exterior (60%) que son una muestra de que la empresa es altamente exportadora de servicio satelital. Satmex 6 por sus características permitirá ofrecer servicios no sólo en México sino a toda América Latina, mientras que los satélites de otras empresas no cuentan con esta flexibilidad. Se tiene la perspectiva de que Satmex 6 es un satélite que

por sí mismo debe generar entre 70 y 80 millones de dólares anuales. Se pretende que para el 2002 se tenga el 20% de preventa y que para finales del 2003 se cubra el 90% del satélite; el 10% restante se mantiene libre en caso de imprevistos.

A últimas fechas en México ya se preparan grandes contratos con consorcios empresariales como Grupo Salinas, además han logrado renovar contratos con los cinco grandes consumidores de México como lo son Televisa, TV Azteca, Teléfonos de México, PCTV y MVS entre otros. El mercado gubernamental también es importante en México dado que representa alrededor del 40% del total.

Con todo, la empresa tiene esperanzas de que su nuevo satélite genere más contratos de largo plazo y alcanzar ventas por 130 millones de dólares para el 2003 y principios del 2004.

## 6.2 Generalidades de Construcción y Pruebas

En términos generales, la construcción de un satélite no solo se refiere al mismo artefacto, sino que deben considerarse las modificaciones de las estaciones de control satelital, el lanzamiento y su compatibilidad asociada al satélite así como la misma administración del programa, que incluye presupuestos, seguros, modificaciones, soluciones, calendario de actividades y de entrega; proceso complejo y que requiere una inversión muy elevada.

Cabe mencionar que durante el proceso de ensamble, los ingenieros, técnicos y todo el personal que participa en el mismo, ponen especial cuidado en la limpieza, ya que la más mínima partícula de polvo podría arruinar un proyecto de muchos millones de dólares, es por eso que se tienen los más altos controles de esterilización (similares a los de un quirófano) esto es, cualquier persona que se encuentra involucrada dentro de esta proceso debe portar batas blancas o azules, gorras y tapabocas ( ver figura 6.1); además por supuesto, de otras medidas higiénicas que se realizan cuidadosamente.

El ensamblaje completo de un satélite es completamente artesanal, en donde los ingenieros tienen que pasar toda una jornada de trabajo acostados sobre los cuadros de fibra de carbono para colocar una a una las mies de componentes del panel principal por ejemplo, así mismo, cada una de sus piezas es única, las cuales no se producen en serie.

Para la construcción de un satélite intervienen alrededor de 2500 personas en la planta de Space Systems Loral subsidiaría de Loral Space & Communications, empresa encargada de construir el Satmex 6, particularmente es incalculable el número de piezas que constituirán el Satmex 6, sin embargo, se sabe que son miles y que cada una de ellas tiene características propias. De igual forma se realizó de construcción del Satmex 5 aunque dicho proceso le correspondió en su momento a la empresa Hughes.

Durante el proceso de construcción se incluyen una serie de pruebas de cada una de las piezas es clave para el cumplimiento global de las especificaciones y luego las pruebas generales, entre las que se incluyen: la evaluación del sistema de frecuencias y bandas, las pruebas de procesos térmicos y vacíos en donde el satélite se coloca en un simulador, prueba de la unidad con antenas, el examen de dinámica, el de acústica donde se verifica la

comunicación del aparato con el centro de control y el de vibración que se hace para garantizar que soportará el lanzamiento. Las pruebas simulan el ambiente en la atmósfera con lo cual se mide su resistencia y sobre todo su operación. Estas fases de prueba también representan un gasto considerable y que además es sumamente necesario.



Fig. 6.1 Ensamble del Satmex 6

### 6.3 Costos de fabricación y lanzamiento de los Satélites Satmex 5 y Satmex 6.

#### 6.3.1 Costo de Satmex 5

El satélite de telecomunicaciones Satmex 5, que actualmente ocupa la posición orbital del Morelos II y cuya capacidad es 10 veces mayor a la de su antecesor, fue lanzado con éxito al espacio por el cohete *Ariane* desde Kuorou, Guayana Francesa, en 1998 después de tres intentos fallidos. El quinto satélite mexicano, y primero en manos de la iniciativa privada, tiene la mayor cobertura en todo el continente americano y es capaz de recibir y emitir señales en Sudamérica, Centroamérica, el Caribe, Estados Unidos y parte de Canadá a través de 48 transpondedores.

Antes de confirmarse que el *Satmex 5* estaba en condiciones de operación, los clientes, en particular, televisoras, empresas telefónicas y medios informativos, ya habían reservado en total el 21 por ciento de la capacidad del satélite mexicano, cuyo costo representó una inversión de 250 millones de dólares, donde 100 millones se emplearon en la construcción del Satélite, 100 millones más en el lanzamiento y aproximadamente 50 millones en el seguro.

### 6.3.1.1 Método TFU para calcular el costo de Satmex 5

Es importante mencionar que es posible calcular el costo de construcción de un satélite por medio del método denominado TFU (Theoretical First Unit), el cual está basado en los pesos de los subsistemas del satélite en cuestión, mismo que describiremos y aplicaremos para aproximar el costo del Satmex 5.

El costo de un sistema es una variable de diseño. Principalmente se usan tres técnicas para desarrollar un modelo de costos:

1.- Consiste en una estimación detallada de principio a fin, se identifica y especifica el número mínimo de elementos que pueden echar a andar el sistema, después se estima el costo de los materiales y de la labor de desarrollo y producción de cada elemento. Debido a que este método consume demasiado tiempo y porque usualmente los datos de diseño detallados no están disponibles, este método es poco apropiado para estudios de sistemas avanzados.

2.- En una estimación análoga se usa el costo de un dispositivo similar y se ajusta para satisfacer las diferencias en tamaño o complejidad. Este método se puede aplicar para cualquier nivel de detalle del sistema, pero resulta un poco inflexible para estudios comerciales.

3.- En una estimación paramétrica se usa una ecuación denominada Relación de estimación de costo o CER por sus siglas en inglés, que expresa el costo como una función del tamaño de diseño y de variables o parámetros de desempeño. En un modelo paramétrico se necesita un CER para el hardware llamado RDT&E (estudio, desarrollo, prueba y evaluación) y el costo TFU (costo teórico de la primera unidad).

Los modelos de costo paramétrico son los más apropiados para estudios comerciales y por lo tanto es el método que utilizaremos para realizar la estimación del costo del satélite Satmex 5. Las principales ventajas de este tipo de modelo son:

- Menor consumo de tiempo que las estimaciones detalladas tradicionales
- Mayor efectividad en desarrollar costos comerciales
- Consistencia en las estimaciones
- Las estimaciones se adaptan en función de si el modelo es aplicable para ciertos sistemas espaciales.

Las mayores limitantes en la utilización de modelos paramétricos son:

- Se aplica solo para el rango paramétrico de datos históricos.
- Los factores de nuevas tecnologías no están incluidos, entonces, el CER debe ser ajustado usando la nueva tecnología.
- Un elemento “mezclado” del cual se desea calcular el costo, puede diferir de los datos utilizados para calcular el CER y por lo tanto hacer el CER inaplicable.
- Las estimaciones generalmente no son tan precisas para ciertos propósitos.

Debemos tomar en cuenta estas limitaciones y adaptar nuestras estimaciones de acuerdo con las necesidades del sistema en estudio. Por ejemplo, si suponemos un subsistema para ser el objeto de estudio, se debe recolectar el costo y el peso de este subsistema de diferentes programas, ajustar todos los costos a dólares del año 1990 y convertir todos los pesos a kilogramos. Después, se debe suponer una relación entre el costo y los parámetros con programas estándar de regresión. Para propósitos de estudio, se limitarán los parámetros a uno o dos, los cuales son principalmente el peso y la potencia. Éstos son los parámetros que están disponibles durante un sistema avanzado. La potencia se usa porque permite relaciones de sistemas no lineares relativamente simples y puede ser acomodada en paquetes de regresión estándar. Además el peso, es el parámetro más común para las relaciones de estimación de costos. El resultado de la regresión es una ecuación entre el costo y el parámetro previamente establecido así como los estadísticos que indican qué tan bien encaja la relación con los datos. Los dos principales indicadores estadísticos son el coeficiente de determinación  $R^2$  y el error estándar SE.  $R^2$  es un indicador de la calidad del ajuste variando entre 0 y 1 donde 1 es el ajuste perfecto. Generalmente se desea un  $R^2$  entre 0.7 o mayor. SE mide la variación del costo sobre la ecuación de regresión. La regresión asume una distribución normal sobre la ecuación de regresión y el SE es una desviación estándar. La desviación estándar del modelo utilizado se incluye en la tabla correspondiente.

La tabla 6.3.1 presenta el CER del segmento espacial para el modelo RDT&E y el TFU. Para nuestro caso utilizaremos solo el método TFU. Los subsistemas que se incluyen en el CER correspondiente son:

- Carga útil.- incluye el sistema de comunicación y los sensores IR y visibles.
- Bus del satélite.- este es el satélite menos la carga útil.
- Estructura/ térmico.- incluye la cubierta, la estructura de soporte , la interfase de lanzamiento y el sistema térmico. Esto asume tecnología de aluminio.
- Rastreo, telemetría y comando (TT&C).- incluye las computadoras a bordo, la electrónica de comando y telemetría, los transpondedores, transmisores, receptores, antenas etc.
- Control de posición.- determina la orientación y el control de reacciones, los instrumentos de determinación incluyen el giroscopio, y los sensores y los de control incluyen los engranes de reacción y la propulsión.
- Potencia.- arreglos solares de silicón (se debe ajustar el costo para las de Arsenuro de galio), baterías de cadmio-níquel, y la electrónica de manejo de potencia. El parámetro es el de la potencia del arreglo al inicio de la vida útil del satélite (BOL).

Además se incluyen las operaciones de lanzamiento que se refieren a la planeación y operación relacionadas con el lanzamiento y el chequeo de la posición orbital, así como el

programa de nivel que se encarga del manejo, ingeniería de los sistemas, sistemas de evaluación y prueba, pruebas de aceptación y la confiabilidad y calidad de la garantía.

La tabla del cálculo del CER presenta costos en miles de dólares fiscales del año de 1990 (FY90\$K) mismos que se tendrán que convertir al año en el que se comenzó la construcción del satélite multiplicando por la inflación correspondiente. Dicha corrección se muestra en la tabla 6.3.2.

Hasta	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
De								
1990	1.305	1.370	1.425	1.490	1.560	1.634	1.710	1.791

**Tabla 6.3.2 Inflación a partir del año 1990**

El cálculo del CER se deriva de datos históricos y actuales y por lo tanto están limitados en rango de los valores de los parámetros, en la tabla 6.3.1 se muestran los rangos aceptables de aplicación, sin embargo para preservar su validez, se recomienda que en las ecuaciones no se utilicen valores mayores al 25% del rango establecido.

El impacto de la nueva tecnología en el valor del CER se presenta en la siguiente tabla:

Factores de costo para tecnología avanzada		
Factor de costo	CER afectado	Método TFU
Componente estructural (Grafito epoxídico)	Estructural / térmico	CER x 2.0
Celdas solares de Arsenuro de galio	Potencia eléctrica	CER x 1.25
Baterías de níquel hidrógeno	Potencia eléctrica	CER + 300
Localizadores adicionales	Posición y control de corrección	CER + 1600

**Tabla 6.3.3 Factores de corrección de Tecnología**

Estos son factores multiplicativos aplicables para el cálculo del CER de un subsistema dado. Para nuestros cálculos del costo de Satmex 5 multiplicamos por estos factores el valor del CER que obtuvimos y que se muestra posteriormente.

**Tabla 6.3.1 Cálculo del CER por el método TFU**

Relación de costo estimado del satélite (CER) Método TFU				
Componente	Parámetro	Rango aplicable	CER	Error Estándar
1. Carga útil				
1.1 Comunicaciones				
Antena	Peso [Kg]	1 -- 87	$21+245*(X^{0.59})$	508 [0.79]
Componentes de comunicaciones	Peso [Kg]	13 -- 156	$191 * (X^1)$	8789 [0.76]
2. Bus del satélite	Peso [Kg]	26 -- 1,237	$198 * (X^{0.77})$	7104 [.076]
2.1 Subsistema estructural / térmico	Peso [Kg]	7 -- 777	$92.3 * (X^{0.65})$	1331 [0.63]
2.2 Telemetría y comando	Peso [Kg]	4 -- 112	$99 + 175 * (X^{0.93})$	1671 [0.80]
2.3 Control de posición				
Posición y control de corrección	Peso [Kg]	9 -- 167	$-389) + 199 * (X^{0.73})$	1067 [0.76]
2.4 Subsistema de potencia	EPS [Kg] * BOL [W]	104 -- 414, 920	$195 * X^{0.29}$	2406 [0.83]
3. Operaciones de lanzamiento y soporte orbita	Peso [Kg]	220 -- 1,279	$64.2 + 1.54 * (X^1)$	342 [0.80]

**Para Satmex 5 se tienen los siguientes datos:**

Componente	Peso [Kg]
Antena	107.3
Repetidor de banda Ku	224.4
Repetidor de banda C	151.6
Telemetría y comando (RF)	14.6
Telemetría y comando digital	32.5
Subsistema de control de posición	84.5
Subsistema de propulsión líquida	117.6
Subsistema de propulsión de xenon	87.6
Subsistema de potencia eléctrica	583.7
Subsistema de control térmico	139
Subsistema estructural	258.7
Equipo alámbrico	131.3

Sustituyendo los datos anteriores en las fórmulas respectivas se tiene:

CER Calculado
67666.9733
3886.6268
71816
4517.6526
6393.3008
4686.2621
16117.8850
3040.5580

Algunos valores deben corregirse para la tecnología actual que se muestra en la tabla 6.3.3 simplemente multiplicando o sumando según sea el caso, el valor del CER obtenido y el factor correspondiente al subsistema afectado. Lo cual nos muestra la siguiente tabla:

CER Calculado
67666.9733
3886.6268
71816
9035.3053
6393.3008
6286.2621
20147.3563
3040.558
<b>188272.3826</b>

Con un total de 188272.3826 FY90\$K o sea, dólares referidos al año 1990 por lo que se debe multiplicar o este resultado por su inflación respectiva al año de construcción del satélite de acuerdo a la tabla de inflación proporcionada anteriormente. Además si consideramos que la construcción del Satmex 5 lanzado en 1999 comenzó entre los años 1996,1997 o 1998 entonces realizamos el cálculo para estos tres años con su inflación respectiva y tenemos:

<b>Año</b>	<b>Inflación desde 1990</b>	<b>Costo Total</b>
1996	1.305	245 695.4593
1997	1.37	257 933.1642
1998	1.425	268 288.1452

Como se mencionó anteriormente, el cálculo del CER por el método TFU nos expresa un costo en miles de dólares que convertido a millones de dólares es:

<b>Costo Total [millones de dólares]</b>	
<b>1996</b>	<b>245.6954</b>
<b>1997</b>	<b>257.9331</b>
1998	268.2881

El costo total de producción se define como:

$$\text{Costo Total: Costo TFU} \times L$$

Donde L es un factor de curva que se calcula mediante fórmula, sin embargo, para satélites comerciales de comunicación se recomienda un valor de  $L = 0.8$

Entonces:

$$\text{Costo Total: Costo TFU} \times 0.8$$

<b>Costo Total [millones de dólares]</b>	
<b>1996</b>	<b>196.5563</b>
<b>1997</b>	<b>206.3464</b>
1998	214.6304

Este cálculo incluye el costo de lanzamiento y se debe incluir el costo del seguro el cual es de aproximadamente 50 millones de dólares. Así, finalmente:

<b>Costo Total [millones de dólares]</b>	
<b>1996</b>	<b>246.5563</b>
<b>1997</b>	<b>256.3464</b>
1998	264.6304

Destacando los años 1996 y 1997 los cuales se aproximan satisfactoriamente al dato aproximado de 250 millones de dólares mencionado antes de la realización de este cálculo, con error aproximado de 1.4% para el 96 y menor del 2.5% para el 97.

### 6.3.2 Costo de Satmex 6

A mediados del 2004, el Gobierno de México y la empresa Satélites Mexicanos lanzarán al espacio un nuevo satélite: Satmex 6 y se espera que sea, entre otras funciones, la columna vertebral del proyecto e-México para enlazar a través de Internet a todas las cabeceras municipales del país así como la telefonía rural. También será un recurso importante para proveer de servicios de televisión educativa a más de un millón de alumnos de 15 mil escuelas rurales en la república mexicana.

Satmex 6 fue diseñado como un satélite geoestacionario, su puesta y localización en órbita es una de las más codiciadas del mundo; si bien requiere de una mayor precisión para colocarlo, mínimo dos grados entre satélites, y representa mayor inversión tanto por la puesta en órbita, así como también por la tecnología que utiliza, su enorme ventaja es que se mantiene fijo respecto a la estación terrena, de esta manera no necesita una computadora de rastreo.

Con el nuevo satélite se busca dar respuesta a una creciente demanda social que requiere servicios de Internet de gran anchura de banda. Principalmente esta demanda se encuentra en zonas de alta marginación ubicadas en el medio rural de nuestro país y que a la fecha, sólo algunas de ellas y no todas, pueden tener limitado acceso a Internet a través de Telefonía Rural de Acceso Celular (TRAC).

El aparato, con cobertura continental, costó cerca de 300 millones de dólares y se encuentra financiado a partir del cobro del seguro por la pérdida de Solidaridad I\*\* y complementado con flujos operativos de la empresa, donde 150 millones de dólares se utilizaron para la construcción, 100 millones de dólares para el lanzamiento y 50 millones de dólares del seguro. Existe un seguro especial para el lanzamiento y cubre por cualquier posible falla y el primer año de vida del aparato, ya después cuando está en órbita, el seguro vale menos de 5 millones de dólares al año.

Haciendo un estimado del tiempo en que se puede recuperar la inversión de la construcción del Satmex 6 se tiene la siguiente reflexión: los satélites tienen una vida útil de 15 años, el satélite mismo se paga en 5 años entonces podemos decir que las utilidades se empiezan a generar del quinto año en adelante, sin embargo en los siguientes 5 años el dinero se usa para su reemplazo, es dinero que se tiene que ahorrar para cuando se muera poner otro, por lo tanto los últimos 5 años son la verdadera utilidad y en el caso de que el satélite exceda su vida de 15 años las utilidades serán mayores. Esto puede ser posible ya que en los procesos de construcciones busca optimizar la masa molecular en más de 2.5 kilos, lo cual permitirá que el satélite dure más tiempo en la órbita geoestacionaria.

Para la fase de pruebas del Satmex 6 se tiene algunos detalles: El proceso consiste en recrear todas las situaciones posibles. Con una tubería de amoniaco interna y una estructura para reducir el impacto del Sol el satélite podrá regular su temperatura, aunque el bombardeo será en rangos de  $-120$  a  $80^{\circ}\text{C}$ , simi-

---

\*\* Satmex 6 reemplazará a Solidaridad I, el satélite que terminó de operar en 2000 y presentó una serie de fallas que afectó en 1999 a 150 empresas de radio y televisión, así como a más de 700 mil usuarios de radiolocalizadores, redes sucursales bancarias, cajeros automáticos, empresas industriales, comerciales y de servicios y centros educativos. Un vapor emitido por uno de sus componentes propició el crecimiento del filamento de estaño en los relevadores del procesador SCP2 redundante, provocando un corto circuito que dañó sus funciones vitales por lo que Boeing, propietaria de Hughes tuvo que pagar a Satmex una fuerte cantidad por los desperfectos de su modelo 601. Según fuentes extraoficiales, con el seguro cobrado por Solidaridad I, la empresa obtuvo 235 millones de dólares, casi el costo total del nuevo Satmex 6.

lares a las que enfrentará en el espacio. De ahí que las pruebas térmicas realizadas en la planta duran hasta 40 días.

Otras pruebas permitirán saber si está listo para usar su banco de baterías durante las 47 veces al año en que sus paneles solares dejarán de recibir energía solar.

Los ingenieros deben estar seguros que el satélite responderá a las maniobras para ponerlo en órbita y mantenerlo en ella, proceso que tendrá verificaciones y ajustes cada quince días a partir de su puesta en operación. Las pruebas ambientales servirán para prevenir el impacto de algún cuerpo pequeño. Cada prueba cuesta aproximadamente 100 mil dólares.

El satélite actualmente se encuentra en fase de pruebas por parte de la empresa Space Systems Loral en Palo Alto, California, y al terminar finalmente será lanzado por un cohete Ariane-5 de la empresa francesa Ariane Space, cuyo objetivo es colocarlo a 36 mil kilómetros sobre la superficie terrestre partiendo desde su base en Kourou, Guayana Francesa.





## CAPÍTULO 7

El uso de los satélites en México se ha limitado a ofrecer servicios de fines comerciales, de seguridad nacional y de entretenimiento como la televisión por cable. Actualmente un uso prioritario de los satélites mexicanos son las redes de conectividad para centros comunitarios para diversos servicios, utilizadas para comunicar a comunidades aisladas y marginadas, con ello se evita la instalación de postes y cables, antenas de microondas y repetidores. También es un recurso tecnológico que se aplica en servicios de telemedicina y telemedición.

Sin embargo, el desarrollo satelital en otros países demuestra que aún existen diferentes tecnologías y aplicaciones para los satélites y que aún no han sido implementados en México, es de suponer que los países del primer mundo nos llevan la delantera en este campo, sin embargo es parte de nuestra tarea mantenernos actualizados y ofrecer servicios basados en tecnologías vanguardistas, que satisfagan las necesidades de los usuarios, y que tengan la disponibilidad de capacidad suficiente para las redes de seguridad nacional y cobertura de carácter social.

En los últimos años se han otorgado concesiones a sistemas satelitales extranjeros para explotar los derechos de emisión y recepción de señales de bandas de frecuencias asociadas a dichos sistemas, lo que representa una fuerte competencia y a la vez un enorme compromiso para el sistema satelital mexicano, por lo que debemos contar con servicios satelitales eficientes, con amplia cobertura y competitivos internacionalmente.

El importante avance cualitativo que en los próximos años experimentarán las tecnologías y sistemas satelitales como resultado de las actuales tendencias en la investigación y desarrollo en este campo, se podrá materializar en cuatro campos que son:

- Elevación de potencias de transmisión y mayor complejidad de las antenas de los satélites, que darán pie a la proliferación de antenas de tamaño muy reducido en las estaciones terrestres.
- Utilización de bandas de frecuencias cada vez más elevadas como vía para la disponibilidad de mayores anchos de banda y, en consecuencia, de mayores capacidades de transmisión.
- Amplia utilización de procesadores de señal y equipos de conmutación a bordo de los satélites, que harían de estos verdaderas centrales de conmutación y no simple repetidores.
- Utilización de enlaces directos de transmisión entre satélites mediante haces láser muy estrechos, que podrán mejorar la operatividad y conectividad de las redes de satélites en comunicaciones mundiales y eliminar la necesidad de múltiples saltos Tierra-Satélite.

En definitiva, el tradicional concepto de satélite repetidor dará paso a verdaderos satélites inteligentes, integrados en la red digital global y capaces de soportar la transmisión directa de señales digitales con una multiplicidad de servicios. Estos satélites inteligentes estarán conectados entre sí, constituyendo nodos y subredes de la red global e incorporarán, por ejemplo, diferentes antenas orientables (hacia la Tierra, hacia otros satélites) y con haces

reconfigurables de cobertura variable en perfil y extensión, con distribución flexible de la potencia entre los diferentes haces.

En este capítulo explicaremos algunas de las tendencias de los sistemas satelitales de comunicación en la órbita geoestacionaria, que engloban los conceptos expuestos anteriormente y que además marcarán el rumbo de desarrollo de los satélites mexicanos.

## **7.1 Tecnologías en el mundo**

### **7.1.1 Sistemas que ofrecen servicio fijo**

El servicio fijo se refiere a la existencia de un satélite o una flota satelital y las estaciones terrenas con las que intercomunican, dichas estaciones permanecen fijas en el lugar originalmente designado, la mayoría de ellas operan en la modalidad de servicio fijo el cual abarca la transmisión y recepción de datos, radio, telefonía y televisión. Satélites de empresas como Satmex, INTELSAT y Panamsat proporcionan esta clase de servicios.

Como se ha venido mencionando al lo largo de este trabajo, Satmex es una empresa en su mayoría mexicana, fusionada con el gobierno mexicano y la empresa Loral, que cuenta con una flota satelital de 3 satélites: Solidaridad 2, Satmex 5 y próximamente Satmex 6 juntos estos satélites ofrecen servicios como:

Conexión a internet, telefonía rural y de larga distancia, el mejor aliado para enlazar localidades aisladas, televisión y radio, educación a distancia como la red Edusat, redes empresariales y videoconferencia. Por ejemplo, en cajeros automáticos o redes corporativas. Telemedicina, primer programa de salud pública del mundo, producido por el ISSSTE. Además de servicios multimedia, redes privadas de voz y dato, sistemas VSAT's, servicios ocasionales, telefonía internacional, televisión corporativa, televisión directa al hogar y televisión por cable.

En el caso de los Satélites controlados por Satmex, las operaciones de rastreo, telemetría y mando se llevan a cabo desde el Centro de Control Iztapalapa, México, y desde el de Control Alterno de Hermosillo, Sonora.

Satmex vende frecuencias dentro de un rango de 500MHz. Este rango lo divide en "x" número de pedazos dando por resultado los canales. Los usuarios deben tener su propio Telepuerto (Carrier) y antenas. Ellos mismos se encargan de subir la señal con su equipo. Satmex ofrece una gran variedad de servicios de transmisión de señales de diferente naturaleza, que cubren una amplia gama de necesidades de telecomunicación en el mercado continental.

Por su parte, INTELSAT es el mayor proveedor de servicios de comunicaciones por satélite del mundo. Es una organización internacional formada por mas de 130 naciones miembros, que actúan de acuerdo a principios comerciales. Tiene más satélites operativos que cualquier otra organización comercial: una flota de más de 20 satélites de alta potencia, técnicamente avanzados en órbita geoestacionaria. En los próximos años serán lanzados trece satélites más. Estos dispositivos representan cuatro generaciones de avances técnicos

y progreso. INTELSAT proporciona cuatro grandes servicios principalmente, para usuarios en más de 200 países, en todos los continentes, dichos servicios son: servicio público de telefonía conmutada, línea privada (red de servicios para negocios), servicios de retransmisión (audio y video), servicios nacionales y regionales.

INTELSAT establece una serie de estándares para las estaciones terrestres que cualquier usuario de INTELSAT debe cumplir. Miles de estaciones terrenas de diversos tipos, acceden al sistema INTELSAT. Debido a su extensos recursos de satélites y espectro de uso, INTELSAT ofrece una conectividad global única, con la posibilidad de unir dos o más puntos en cualquier lugar del mundo. INTELSAT es una de las primeras organizaciones que proporcionaron una extensa cobertura global de satélites y conectividad para un amplio abanico de servicios de telecomunicaciones.

Otra organización muy importante es Panamsat que ofrece una variedad de servicios de telecomunicaciones que hoy en día, se adaptan al mundo de los negocios internacionales. Posee un sistema global de 25 satélites para facilitar una gran variedad de servicios de comunicaciones, bien sean domésticas en Estados Unidos o en el extranjero. Muchas empresas de telecomunicaciones con sede en los Estados Unidos, Latinoamérica, África y Asia utilizan la capacidad satelital internacional de Panamsat por su capacidad satelital de última tecnología. El sistema global de alta potencia permite la implementación de portadoras de alta velocidad utilizando antenas pequeñas de bajo costo.

Actualmente Panamsat opera con 19 satélites, cada uno está especialmente diseñado para cubrir las necesidades de los clientes, proporcionando la máxima flexibilidad en potencia y cobertura. Tiene en funcionamiento en su sistema de satélites 530 transpondedores, de los cuales 290 están operativos en la banda C y otros 320 en la banda Ku. Para el 2001, Panamsat contaba con una disponibilidad de 900 transpondedores.

Finalmente mencionaremos a Eutelsat cuya flota satelital conformada por 18 satélites (hasta el 2001) geoestacionarios, es considerada como una de las más grandes a nivel mundial, es una organización europea que ofrece servicios públicos de telefonía, transmisión de datos, televisión esencialmente. Originalmente fue creada para satisfacer las necesidades de la comunidad europea, sin embargo extendió sus servicios hacia el Medio Oriente, África, el sudeste de Asia, Rusia e inclusive en América del Norte y del Sur. En los últimos dos años se lanzaron seis satélites más conformando una flota de 24 satélites.

### **7.1.2 Satélites de Banda Ancha**

El constante crecimiento de las telecomunicaciones mundiales ha demandado servicios de mayor velocidad que los que actualmente se ofrecen, esto lleva consigo la utilización de un espectro de frecuencias más amplio, aunado a que las actuales bandas satelitales C y Ku están demasiado saturadas, se han comenzado a desarrollar aplicaciones de transmisión de voz, datos y video en tiempo real, acceso a internet, videotelefonía entre otras, utilizando la banda Ka que al igual que la banda Ku permite el uso de pequeñas terminales. En este capítulo hablaremos de algunos avances en la banda Ka desarrollados actualmente.

*Sistema WildBlue*

Hoy en día, Internet móvil es una tecnología de vanguardia que en México se ofrece por medio de antenas colocadas a través de la red de telefonía celular, que proporciona servicios como páginas WEB, correo electrónico, foros de discusión, chats y mensajes emergentes, vía su propio teléfono celular. A corto plazo, se prevé que Internet también se apoyará en la tecnología satelital, la cual ya ha sido desarrollada y tiene una frecuencia de transmisión más alta, 100% digital. Sin embargo, el costo de este tipo de aparatos es muy alto por lo que aún no está accesible para la población. Más adelante, cuando los precios disminuyan para los usuarios finales será usada para Internet móvil, esto debido al costo del desarrollo. Mientras tanto, en México éste sigue siendo un servicio terrestre basado en antenas. No obstante en Estados Unidos se ofrecerá este servicio a través del sistema WildBlue

Para este servicio se lanzará en el segundo trimestre del 2004 el satélite Anik F2 construido por la empresa Boeing. Por su parte Space Systems Loral recientemente anunció la construcción de su satélite WildBlue-1 el primer satélite comercial dedicado a la banda Ka de banda ancha para la compañía. Éste representará el segundo satélite para la empresa WildBlue la cual recibió una inversión por parte de INTELSAT de varios millones de dólares para su construcción y que entrara en operación a principios del 2004. Sin embargo, este satélite se lanzará de acuerdo a las demandas de los consumidores

El servicio ofrece una conexión a internet de alta velocidad para una casa o una oficina completa, hasta 25 veces mejor que la que actualmente ofrece un módem convencional de 56K. El usuario solo necesitará un módem pequeño para la conexión y un disco parecido al de televisión directa al hogar de tan solo 66cm. con el cual tendrá comunicación bidireccional con el satélite. También pretende ofrecer velocidades para bajar información desde internet de 1.5 Mbps y de 256 Kbps para subirla a la red. Todos los paquetes WildBlue incluirán e-mail y espacio en la red además de otros servicios de ISP sin costo adicional.

WildBlue planea explotar la banda Ka (20-30 GHz) usando satélites geoestacionarios, esto permitirá un acceso a internet de cobertura nacional con un solo satélite. Estos satélites ofrecerán asignación bajo demanda para los consumidores. Para ofrecer este servicio sin importar la región en donde el usuario se encuentre, WildBlue utiliza un gran número de pequeños haces puntuales, en lugar de un solo cono de cobertura continental, con esto se espera cubrir a ciudades pequeñas y zonas rurales. Este servicio está orientado a un mercado de aproximadamente 30 millones de hogares en los Estados Unidos que no tienen acceso a servicios de cable.

La instalación de los discos se lleva a cabo por el personal especializado de la empresa quienes eficientemente instalarán y activarán el servicio de banda ancha WildBlue debido a que la dimensión de los mismos (66cm x 69cm), facilita su implementación en el techo de los hogares u oficinas, un cable desde el disco se conectará al módem satelital (pequeña caja situada al lado de la computadora) la cual la conectará vía Ethernet. No se permitirá que los usuarios realicen esta instalación, ya que se debe asegurar el correcto apuntamiento del disco hacia el satélite y que las conexiones ser realicen apropiadamente, por lo cual solo el personal especializado podrá hacerlo. Para este servicio no se requerirá una línea

telefónica ya que como se mencionó WildBlue en un servicio de internet inalámbrico bidireccional.

### *Spaceway*

Spaceway es el siguiente gran paso de Hughes para proveer a sus clientes las soluciones más innovadoras en la comunicación satelital, está planeado que ofrezca sus servicios en Norteamérica para el 2004. es un sistema satelital de nueva generación cuyas capacidades permitirán habilitar aplicaciones terrestres, abrir nuevos mercados y desencadenar un gran cantidad de servicios de forma directa en banda ancha y aplicaciones multimedia de alta velocidad

Este sistema opera en la banda Ka, tiene un alto desempeño, ya que cuenta con procesamiento digital a bordo, conmutación de paquetes y tecnología de haces puntuales de cobertura para ofrecer conectividad particular sin importar la ubicación. Con Spaceway los usuarios y eventualmente los consumidores de grandes negocios, los proveedores de servicios de telecomunicaciones, oficinas pequeñas, oficinas en casa tendrán acceso a las aplicaciones de banda ancha como telemedicina, videoconferencia, educación a distancia interactiva a grandes velocidades a un costo más accesible que los ofrecidos por sistemas terrestres convencionales como Frame Relay\*. Spaceway se integrará a los existentes servicios basados en tecnología local y redes de cobertura ancha y será completamente compatible con el amplio rango de estándares industriales. Su arquitectura permitirá a los usuarios comunicarse directamente vía satélite sin conectarse a través de un servicio de retransmisión o hub. Basado en asignación de ancho de banda bajo demanda, significa que los usuarios solo pagarán por el ancho de banda que su aplicación requiera ya sea de transacciones de datos de baja velocidad, transmisiones de varios megabits o video intensivo.

Su constelación estará basada en dos satélites de alta potencia HS 702 de la empresa Boeing Satellite Systems.

### **7.1.3 Satélites de servicio móvil de banda angosta**

En las redes de comunicación de servicio móvil o MSS (Mobile Satellite Services), a diferencia de las de servicio fijo, la posición de al menos uno de los extremos de la comunicación está indeterminada.

Cerca del 90% de la superficie de la Tierra, están fuera del alcance del cableado y de las redes de telecomunicaciones convencionales, por lo que se hace necesaria la utilización de un sistema de satélites que facilite las comunicaciones a la gente que viva, trabaje o viaje por lugares remotos de la Tierra. También, más del 50% de la gente de la Tierra se encuentra "incomunicada", ya sea por su ubicación geográfica o porque no cuentan con un servicio de telecomunicación. Aquí es donde aparece INMARSAT, que permite desde enlaces de alta velocidad en operaciones de minería remotas, hasta controlar las maniobras de rescate en algún accidente marítimo.

INMARSAT (International Maritime Satellite Organization) es una organización internacional creada en 1979 que opera un sistema mundial de comunicaciones móviles por

satélite. En un principio, se fundó para mejorar las comunicaciones marítimas con objeto de incrementar la seguridad en el mar. Actualmente, además de suministrar servicios de telefonía y transmisión de datos a embarcaciones y plataformas marítimas, aporta también servicios para la comunidad aeronáutica y para los móviles terrestres. Hoy en día 79 países son miembros de los cuales Estados Unidos cuenta con la mayor parte (alrededor de un 23%), seguido del Reino Unido y Noruega.

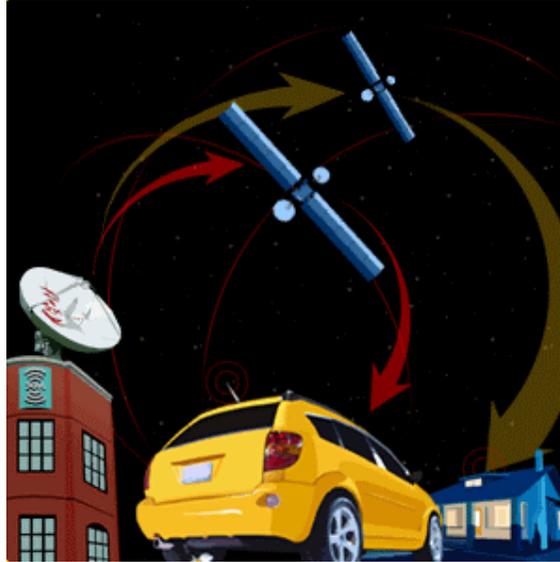
INMARSAT (así como otras organizaciones que proveen comunicaciones globales vía satélite) sienta las bases para el desarrollo y el crecimiento económico de todo el mundo. Además, con el lanzamiento de su tercera generación de satélites, que incorpora lo último en comunicaciones digitales y tecnología multihaz, así como el desarrollo del proyecto ICO de telefonía móvil vía satélite, Inmarsat permitirá establecer comunicaciones desde cualquier punto de la superficie terráquea.

Del total de los 79 países que componen Inmarsat, diez corresponden a Hispanoamérica y a los países del Caribe. La inversión que representan estos países dentro de la organización es del 2.5%. Además, Argentina, Brasil, Colombia, Cuba y México también han invertido directamente en la compañía ICO (encargada de desarrollar un proyecto de telefonía móvil vía satélite )

La constelación INMARSAT consta de 5 satélites de la tercera generación que son administrados desde su centro de control principal ubicado en Londres. Estos satélites utilizan la banda L (1.53-2.7 GHz) para terminales móviles en enlaces de subida y bajada y la banda C para terminales terrestres (telepuertos).

#### **7.1.4 Sistemas de radio digital**

Mientras que la televisión dio un paso adelante rumbo a la tecnología digital, la radio ha permanecido estancada en la tecnología analógica, sin embargo en los Estados Unidos se está desarrollando la transición al sistema de radio digital. Dicha conversión ofrece demasiados beneficios que no están disponibles en los sistemas AM y FM, A pesar de que una buena señal de FM sintonizada en una estación terrestre es comparable con la calidad de un CD, en un receptor móvil (el típico de un vehículo), la calidad del sonido comienza a degradarse debido las imperfecciones del canal que experimenta una señal de FM. Por eso se ha pensado en la tecnología digital para radiodifusión móvil. Lo mismo le sucederá a las frecuencias de AM en cuyo caso la diferencia en la calidad del sonido será más marcada y será comparable con la calidad de FM actual. Adicionalmente la tecnología digital incrementará la robustez de la radio terrestre debido a la habilidad de las señales de resistir a factores como la interferencia, y el ruido del ambiente. La robustez digital también funciona bien contra la interferencia de señales de radiodifusoras cercanas, otra razón un poco menos tangible de esta transición al mundo digital es la percepción del consumidor. La radio terrestre es una de los pocos servicios de comunicaciones analógicas ofrecidos en un mundo cada vez más digital. Dos de los principales sistemas que ofrecerán radio digital SDARS (Satellite Digital Audio Radio Services) en Estados Unidos son: el sistema denominado XM Radio y Sirius Satellite Radio.

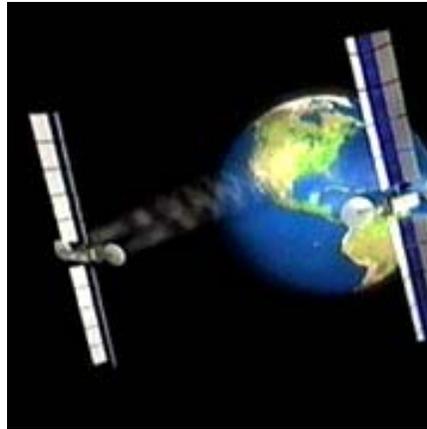


**Fig. 7.1** Sistema de Radio Digital

Ambos sistemas comparten numerosas similitudes como el mismo número de canales separados de radio. Así mismo tienen diferencias importantes, la más marcada es la configuración orbital de sus satélites y sus planes de suscripción y cobro.

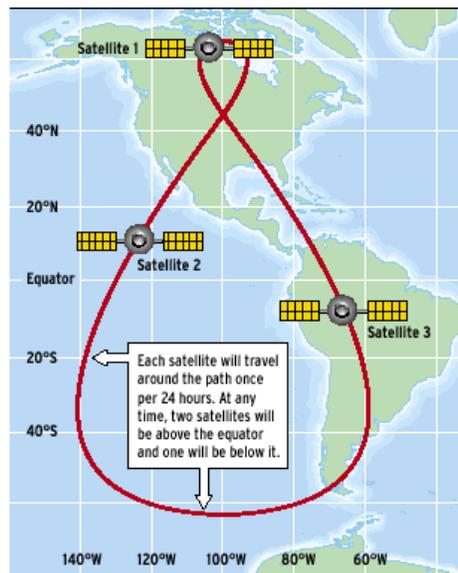
XM radio tiene una constelación de 2 satélites geoestacionarios construidos por Boeing denominados Rock and Roll (Fig. 7.2) mientras que Sirius tiene 3 satélites colocados en una órbita elíptica (Fig. 7.3) donde cada satélite tiene un ciclo de 16 horas. XM radio planea incluir mensajes de suscripción en su programación con fines de financiamiento, mientras que Sirius planea ser comercialmente gratuito. En ambos sistemas el alcance es lo más importante el mercado de radio, principalmente el rural actualmente no atendido por los servicios existentes, no dudaría en aceptar los beneficios ofrecidos por la radio satelital. Los proveedores del servicio son optimistas y planean captar un mercado cada uno mayor a 4 millones de usuarios lo cual es posible en un país con una población de 300 millones. Técnicamente los sistemas Sirius y XM radio son únicos en muchas formas porque estos sistemas están diseñados para servir primordialmente a usuarios móviles y donde los receptores individuales deben costar mucho menos que cualquier receptor satelital antes construido.

XM radio ofrece 68 canales gratuitos de música, 32 canales de noticias, deportes y entretenimiento y 21 canales de servicio instantáneo de tráfico y clima por tan solo 9.9 dólares al mes. Sirius tiene 50 canales de música y 50 de noticias y entretenimiento.



**Fig. 7.2** Satélites Rock and Roll de XM radio

XM ha implementado un sistema de diversidad espacial que funciona como una especie de redundancia , este arreglo reduce la probabilidad de que la señal del satélite sea completamente bloqueada para el receptor, ( Sirius también utiliza la diversidad espacial pero de forma distinta). Bajo circunstancias ideales un receptor verá a los dos satélites y estará constantemente recibiendo y procesando las señales de los dos, pero en caso de que un obstáculo bloquee la señal de alguno, el otro seguirá enviando la información para no interrumpir el servicio. Las dos formas de diversidad utilizadas en ambos sistemas, son diversidad de frecuencias y diversidad de tiempo la cual introduce un poco de retraso al sistema. En el sistema Sirius la movilidad constante de los satélites trae consecuencias operacionales debido a que solo dos de los tres satélites podrán transmitir en un tiempo determinado, de otra forma tendrían que transmitir en la misma banda de frecuencias lo que causaría interferencia entre ellos. Para evitar este problema , al mismo tiempo que en que los satélites entran y salen de la zona de cobertura debe ocurrir un hand off es decir que un satélite cese la transmisión mientras que el otro la inicia, lo cual causará una interrupción del orden de milisegundos en el receptor, sin embargo mientras el tercer satélite no esté bloqueado durante este hand off , para el usuario, la interrupción pasará inadvertida.



**Fig. 7.3** Constelación de Satélites Sirio

Ambos sistemas utilizan una red de estaciones terrestres para retransmitir la señal del satélite cuando pase por áreas de difícil alcance como túneles y cañones. Estos repetidores terrestres utilizan una técnica de modulación diferente a la que utilizan los satélites, siendo optimizada para uso de transmisores terrestre, llamado multiplexión por división de código ortogonal de frecuencia COFDM contra la QPSK usada en los satélites.

La distribución del espectro para SDARS (25 MHz) está repartido como sigue: de (2320-2332.5 MHz) para Sirius y de (2332.5 – 2345 MHz) para XM radio según se muestra en la siguiente figura:

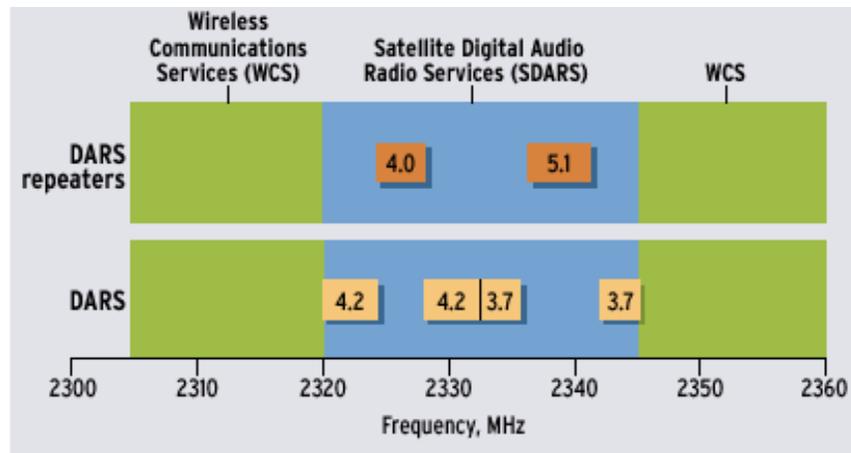


Fig. 7.4 Espectro de Frecuencias para XM radio y Sirius

Por su parte ya existen receptores usados para el SDARS contruidos por las marcas Pioneer , Alpine y Sony la cual cuenta con un sistema “quitapón” para el auto y la casa para el sistema XM. Un estéreo de auto para XM radio costará alrededor de 150 dólares más que un sistema AM/FM estándar. Por su parte, Sirius con las marcas Kenwood, Panasonic, Clarion y Alpine entre otras, hizo una alianza con las marcas de autos, Ford, Chrysler, BMW, Mercedes, Jaguar y Volvo para instalar radios (AM/FM/SAT) aunque todavía no se han mencionado precios pero se estima que sea entre 300 y 500 dólares.

### 7.1.5 Enlaces entre Satélites ISL

Ocasionalmente, hay aplicaciones en donde es necesario establecer comunicación entre satélites. Esto se realiza usando enlaces cruzados entre satélites o enlaces intersatelitales (ISL)\*. Una desventaja de usar un ISL es que el transmisor y el receptor son enviados ambos al espacio. Consecuentemente, la potencia de salida del transmisor y la sensibilidad de entrada del receptor se limitan.

La conveniencia de utilizar ISL's se fundamenta en las ventajas que ofrecen, por una parte, la posibilidad de encaminar el tráfico de larga distancia a través de estos enlaces, dota de autonomía al sistema, reduce los inmensurables costos de los enlaces PTSN (debido a que dependen de la orografía del terreno ) y reduce el retardo de propagación. Además , se puede dar servicio a amplias zonas en las que el satélite no puede ver ningún punto de enlace. ( por ejemplo , en el Océano Pacífico ). Generalmente , los requerimientos del handover\*\* pueden verse reducidos gracias a que el enlace con un determinado punto, puede mantenerse mientras un determinado usuario móvil permanezca en la zona de servicio de un determinado satélite. En cambio, sin ISL's , el satélite tiene que ver simultáneamente el punto de enlace y el usuario móvil. Finalmente, es importante mencionar que los ISL's permiten transportar señalización e información para la administración de la red.

Por otro lado, la introducción de los ISL's también incluye un cierto número de inconvenientes, como el peso adicional, la complejidad y el costo de la carga útil del satélite. En efecto, se requieren antenas ISL, transmisores y receptores, así como dispositivos de conmutación abordo. Las necesidades de apuntamiento, adquisición y seguimiento ( PAT )\*\*\* incrementa todavía más la complejidad ya que requieren antenas ISL orientables ( además de las antenas GWL).

En general, en los sistemas LEO diseñados para obtener cobertura total , las ventajas compensan ampliamente los inconvenientes. No suele ocurrir lo mismo con los sistemas ICO.

De acuerdo al tipo de conexión, se distinguen dos tipos de ISL's :

- ISL intraplanos : conectan satélites de un mismo plano orbital.

Los ISL's intraplanos pueden mantenerse con antenas fijas. Dentro de este grupo podemos mencionar enlaces entre satélites de órbita baja, es decir, LEO-LEO o de órbita geoestacionaria GEO-GEO.

- ISL interplano : conectan satélites de planos orbitales diferentes.

Dos satélites de planos orbitales diferentes se ven el uno al otro con un ángulo de apuntamiento variable. Así pues, los ISL's interplanos requieren generalmente antenas

---

\* de sus siglas en inglés Inter-Satellite Link

\*\* handover, término que se utiliza para la conmutación o cambio de una frecuencia a otra.

\*\*\* de sus siglas en inglés Pointing, Acquisition and Tracking

orientables Aún es más, los ISL's interplano no tienen por qué mantenerse indefinidamente.

La distancia entre dos satélites de planos orbitales adyacentes varía sensiblemente a medida que éstos se desplazan por su órbita, pudiendo darse el caso de que la tierra se interponga en su línea de vista. Cuando se dan estas situaciones, el enlace debe tener la posibilidad de conmutar ( activo / inactivo ) lo que exige un enorme esfuerzo de apuntamiento, adquisición y seguimiento (PAT). Tal es el caso de los enlaces de orbita baja LEO, con un satélite geoestacionario GEO donde el enlace sería LEO-GEO un enlace de este tipo es experimentado por la Agencia Espacial Europea con su sistema SILEX que se refiere a enlaces intersatelitales con terminal láser-óptica para comunicaciones.

Actualmente se están desarrollando nuevas tecnologías para los ISL's como la utilización de láseres ópticos para la intercomunicación, cuyas principales ventajas serían una mejora

en el ancho de banda, la utilización de antenas de reducido tamaño y efectos de dispersión nulos. Muchas empresas de prestigio manejan proyectos de enlaces intersatelitales tanto de microondas como ópticos que posiblemente entrarán en función en fechas no muy lejanas.

## **7.2 Posibles implementaciones en los próximos satélites mexicanos**

### **7.2.1 Sistemas Microelectromecánicos (MEMS)**

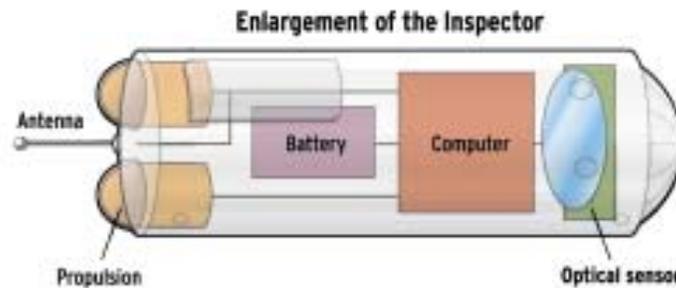
La industria satelital podría experimentar la más grande revolución en su historia gracias a algunas de las máquinas más pequeñas en existencia. Los investigadores en este campo han desarrollado experimentos diseñados para convencer a la industria aeroespacial de que los sistemas microelectromecánicos (MEMS), podrían abrir las puertas hacia una producción en masa de satélites a bajo costo y de alta confiabilidad. La tecnología MEMS permite juntar dispositivos electrónicos con micromáquinas, haciendo posible tener todo un sistema en un solo chip.

Los MEMS combinan la electrónica convencional de semiconductores con transmisores, niveladores, acelerómetros, diafragmas, controladores de calor, propulsores microfluídicos, todos ellos microscópicos en tamaño. Se pueden hacer arreglos completos de cosas con los MEMS que no podrían ser hechos de otra forma. Todos los satélites requieren un conjunto básico de subsistemas para hacer un trabajo eficiente cuando se encuentren en órbita, la mayoría los hemos mencionado en los primeros capítulos como el subsistema de potencia, de comunicaciones, de propulsión etc. Si todas estas funciones pueden ser desempeñadas por MEMS entonces podemos empezar a pensar en fabricar subsistemas satelitales como se fabrican hoy en día los chips para teléfonos o laptops. Los satélites pueden ser construidos por diafragmas apilados cubiertos por MEMS y componentes electrónicos. El resultado podría ser un satélite de 1Kg. o picosatélite que podría ser producido en grandes cantidades, de esta forma se construirían constelaciones con cientos de ellos. Dichos satélites teniendo requerimientos insignificantes de masa, tamaño y potencia, pueden ser fácilmente empacados en un satélite convencional o lanzados usando vehículos lanzadores de menor tamaño y costo. Algunas de las ventajas de usar satélites basados en tecnología MEMS son precisamente los menores costos de lanzamiento y la alta resistencia a la radiación y a la vibración. El costo de colocar un satélite en órbitas bajas LEO es de alrededor 10 000

dólares por Kg. claramente, el lanzamiento de satélites más pequeños y ligeros costarán mucho menos. También prometen tener un menor costo de desarrollo y fabricación que los satélites convencionales. Robustez es también pieza clave, es decir, los MEMS son mucho más resistentes a los daños por radiación y son capaces de operar confortablemente en ambientes de muy alta radiación como los cinturones de Van Hallen, éstos ocupan una región del espacio entre las órbitas LEO y la congestionada órbita GEO. Potencialmente esta región no ha sido explotada debido a las dificultades prácticas y sobre todo económicas de colocar satélites convencionales en esa zona protegidos contra tal cantidad de radiación. Entonces, los MEMS tienen resistencia a grandes niveles de vibración e incluso a choques con un cohete.

La razón por la cual los dispositivos basados en MEMS soportan este tipo de fuerzas mucho mejor que los dispositivos de tamaño convencional es claro, la masas de cada componente móvil es extremadamente pequeño, entonces las fuerzas internas potencialmente dañinas entre los componentes son también muy pequeñas.

Sin embargo, la primera aplicación de satélites miniatura basados en tecnología MEMS no será como la de un satélite independiente de larga vida útil ni tampoco la de una constelación, sino más bien la de un dispositivo inspector de corta vida. Un inspector consistiría de una batería, una computadora de control, una pequeña unidad de propulsión y algunos sensores ópticos o de otro tipo como un detector infrarrojo (Fig. 7.5). Éste se comunicaría inalámbricamente con su satélite.



**Fig. 7.5 Imagen alargada de un inspector**

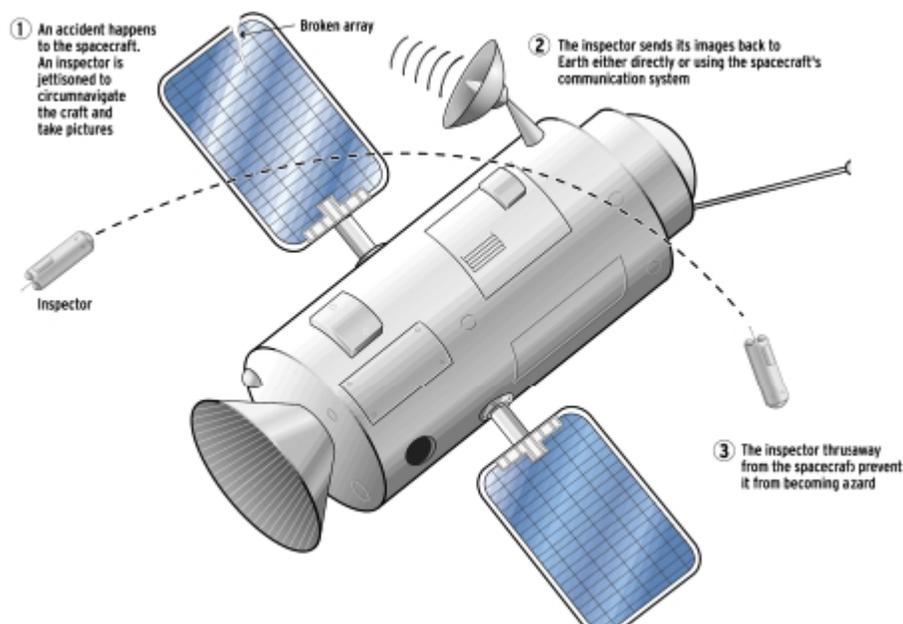
Cuando un satélite funciona mal, se hace un gasto de tiempo y energía para determinar qué fue lo que pasó y adivinar su estado actual. Este esfuerzo podría reducirse si estuviesen disponibles una fotografía o dos del daño, para los controladores en tierra, esto gracias a un inspector. Los inspectores podrían jugar un papel muy importante durante la construcción de la Estación Espacial Internacional, y como esta larga estructura está destinada a degradarse con el tiempo, los inspectores serán una necesidad. Cada satélite podría cargar uno o dos inspectores de escasos 250 gramos, los cuales podrían permanecer pasivos hasta que se necesitasen. Si se presenta una anomalía, podrían salir para el reconocimiento (Fig. 7.6)

De la figura observamos que el punto número 1 es cuando el inspector se dispara para circunnavegar y tomar las fotografías cuando ocurre una falla, en el paso 2 manda las imágenes de regreso a la Tierra ya sea de forma directa o utilizando el sistema de

comunicaciones del satélite y, finalmente en el paso 3 el inspector es expulsado del satélite para evitar convertirse en un peligro.

El satélite SNAP-I construido por la universidad de Surrey en Inglaterra fue lanzado en junio del 2000 a bordo de un satélite ruso, a pesar de que el diseño miniatura no utilizaba MEMS, su misión fue la de validar el concepto de inspector que permitiría observar el desempeño del satélite y la video telemetría. Los satélites de la universidad de Surrey pretenden usar tecnología MEMS en futuros microsátélites.

Sin embargo esto no sucederá tan pronto, ya que hay un largo camino por recorrer antes de que todas las funciones de un satélite puedan ser duplicadas por componentes basados en sistemas microelectromecánicos. El más grande reto que han enfrentado los picosatélites es el mismo que enfrenta la tecnología MEMS: la de mantener un alto grado de capacidad bajo severas restricciones de tamaño, masa y potencia, se necesita alta ingeniería para probar que los dispositivos microelectromecánicos pueden funcionar adecuadamente en el espacio. Cada subsistema debe demostrarse en la práctica. Para este fin, ingenieros de la industria aeroespacial, han comenzado programas de desarrollo para un ambicioso satélite que involucra una secuencia de misiones de prueba. Inicialmente los investigadores solo querían mandar algunos switches MEMS experimentales diseñados para el switcheo de señales de radiofrecuencia. Así mismo se dieron cuenta de que lo más conveniente para probar estos dispositivos era hacerlo con una plataforma miniatura de prueba y no montados sobre naves espaciales convencionales.



**Fig. 7.6 Funcionamiento del inspector**

Los experimentos realizados con MEMS dependen directamente de la madurez de la tecnología y los avances disponibles en esta área.

Otros picosatélites experimentales son el llamado OPAL, operado por la universidad de Stanford y el MigthySat 2.1 creado por un grupo de tecnología MEMS en Pasadena California. En ambos proyectos se logró demostrar la factibilidad del concepto de inspector así como también se comprobó su habilidad para probar MEMS en el espacio.

El siguiente paso para la industria aeroespacial es colocar subsistemas microelectromecánicos a bordo de picosatélites como componentes funcionales, no solo como dispositivos de prueba. Los siguientes vuelos usarán switches de radiofrecuencia para conmutar antenas en modos de recepción y transmisión y también para probar los giroscopios MEMS del mismo. El giroscopio es un asistente para determinar la orientación del satélite. Los giroscopios tradicionales mantienen un marco de referencia fijo, pero en los basados en MEMS, tres pares de sensores de velocidad y acelerómetros son montados perpendicularmente entre ellos para monitorear los movimientos de la astronave. Pero mientras la tasa de desviación de los giroscopios MEMS son una secuela que no afecta tanto a las misiones tipo inspector de corta vida, la más mínima desviación puede afectar enormemente la habilidad de navegación de los satélites de larga vida basados en MEMS. Una posible solución es usar la red del sistema de posicionamiento global (GPS) para recalibrar periódicamente el giroscopio. Después de esto los elementos ópticos basados en sistemas microelectromecánicos, como cámaras miniatura y sensores infrarrojos son seguidos por un sistema microfluídico para propulsión básica. Aquí tanques pequeños sumergidos en una capa de silicón y cubiertos por otra capa de silicón podrán soportar pequeñas cantidades de propelente. Los canales microfluídicos guiarían el fluido hacia una boquilla donde será acelerado para proporcionar empuje. Entre las propuestas sugeridas están: membranas vibrantes, una turbina de gas de 1cm de diámetro y propelentes ionizados acelerados eléctricamente.

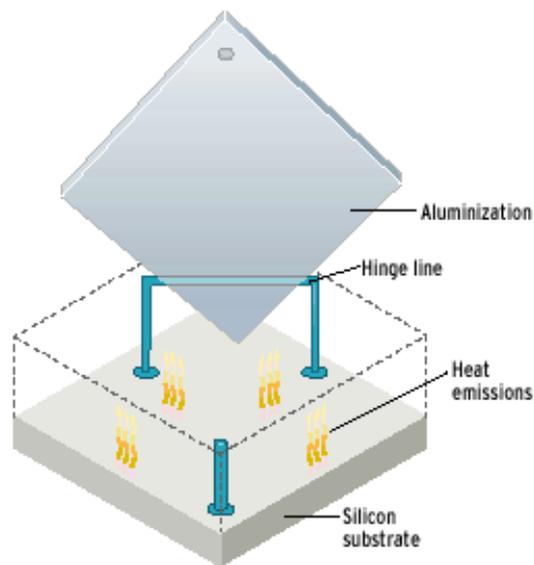
El escape de las válvulas MEM aún cuando están envueltas en esa diminuta cantidad de propelente, inclusive a bajas tasas de escape, pueden dejar al satélite sin combustible. Pese a estos retos, será posible demostrar la funcionalidad completa de un inspector.

Los subsistemas satelitales basados en MEMS son frecuentemente muy diferentes a sus contrapartes convencionales como lo mostró el giroscopio. Dos de los más importantes sistemas en desarrollo son el de propulsión y el de control térmico.

El control de temperatura es especialmente importante en satélites de órbitas LEO donde sus periodos orbitales varían entre 60 y 100 minutos, probablemente con la mitad de este tiempo directamente orientados a los rayos del sol y la otra mitad bajo la sombra de la Tierra, dependiendo de la órbita precisa. Las temperaturas externas varían enormemente, entonces el satélite se debe prevenir a sí mismo de ser horneado y congelado alternadamente. En satélites convencionales, este problema se puede solucionar con recubrimientos termales que funcionan como escudo y con tuberías que permitan el flujo de calor, sin embargo, un dispositivo que solo pesa algunos gramos necesita una solución diferente.

Para misiones de corta duración el aislamiento es suficiente. Los picosatélites de prueba que se han puesto en órbita, tienen una larga bobina que aísla la conexión de las antenas externas de la electrónica. Los tableros electrónicos y los arreglos de MEMS son aislados de la cubierta de aluminio por medio de soportes de plástico que tienen una forma torcida para aumentar la longitud de la trayectoria que el calor debe seguir.

Los satélites de larga vida, requieren sistemas más complejos. Una opción podría ser cubrir la superficie del satélite con delgadas rejillas de ventilación como se muestra en la figura 7.7 Estas rejillas estarían soportadas por una bisagra por encima de la superficie de silicón, sus cubiertas deben ser de aluminio para reflejar el calor y la luz y la cubierta de silicón con un material de alta emisividad. Cuando se requiere disipar el calor, las rejillas se abren de cara opuesta al sol girando sus bisagras electrostáticamente para exponer la cubierta de alta emisividad. Como el silicón es transparente a la radiación infrarroja, la fuente de calor debajo de la cubierta, radiaría hacia el espacio, lo que enfriaría al dispositivo. También podrían incrustarse canales sobre una cubierta de silicón con una delgada capa para crear tubos de calor miniatura, el metanol podría esparcirse a lo largo de estos tubos para transferir el calor de una porción del satélite a otra.



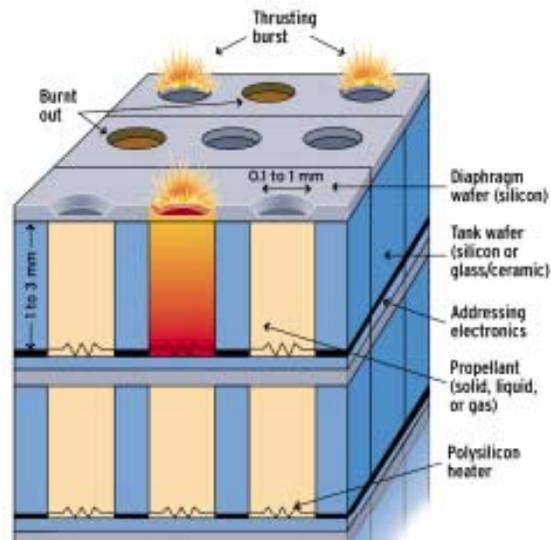
**Fig. 7.7** Rejilla que controla la temperatura del satélite

En cuanto a la propulsión, los satélites necesitan de ella por dos motivos: para moverlos de un lado a otro y para control de posición. Un satélite que no controla su orientación hacia el sol, perdería potencia en sus celdas solares o un satélite que no oriente correctamente sus antenas hacia una estación terrena de terminada o hacia otro satélite es inservible. Generalmente hablando, una vez que el satélite ha alcanzado su órbita deseada, su control de posición se convierte en la principal función del subsistema de propulsión.

Un propulsor digital basado en tecnología MEMS para control de posición, está siendo desarrollado por Aeroespacial TRW y por el Instituto de Tecnología en California. El

propulsor está compuesto por un diafragma de silicón cubierto por una fina rejilla de células individuales que contienen material explosivo. El diafragma se coloca en la superficie externa del picosatélite. Cuando se detonan por medio de un elemento de calor eléctrico, cada célula produce una pequeña explosión que proporciona cierta propulsión. Diferentes patrones de células son encendidas para producir diferentes cantidades de propulsión uniforme alrededor de los ejes del diafragma y usar dicho diafragma tan lleno como sea posible. Para futuras versiones, una vez que todas las células utilizables sean encendidas, el diafragma puede ser desechado para exponer un nuevo diafragma apilado por debajo del anterior. Como se muestra en la figura 7.8

Los usos de impulsores digitales también existirán en largos satélites convencionales. Los satélites largos, usualmente tienen largos arreglos solares fotovoltaicos que alcanzan la potencia que necesitan. En el momento del despliegue dichos arreglos solares tienden a sacudirse de un lado a otro de forma que el satélite completo oscila. Entonces dichos propulsores de un solo disparo, serán capaces de amortiguar estos movimientos. Los movimientos pueden ser medidos por un acelerómetro basado en MEMS y una unidad de control que podrían calcular cuál propulsor se debe encender para neutralizar el movimiento. Los propulsores digitales han sido probados como parte de una nave espacial de sondeo (aquella que sigue una trayectoria de vuelo dentro de o sobre la superatmósfera. Durante el lanzamiento 30 de los 29 propulsores miniatura fueron probados dando resultados satisfactorios.



**Fig. 7.8** Propulsor Digital

Para maniobras orbitales de mayor duración, se pueden usar sistemas de propulsión microeléctrica. Los sistemas de propulsión eléctrica utilizan campos eléctricos para acelerar los iones de metales pesados del satélite empujándolo a la posición opuesta. Son muy eficientes, pero proporcionan bajas cantidades de propulsión. Los satélites largos pueden usarlos sólo en misiones prolongadas como expediciones interplanetarias que permiten que la velocidad se intensifique durante semanas. Pero un satélite de 1 Kg. requiere simplemente entre 1 y 10 milinewtons de propulsión, haciendo la propulsión eléctrica una opción viable para maniobras rápidas.

El pequeño tamaño de estos satélites también significa que refiriéndonos a su tamaño total, el área que colecta potencia solar es más grande que en uno convencional, lo que le da una mucho mejor relación de potencia eléctrica –peso al sistema de propulsión.

Adicionalmente el ambiente espacial muestra una serie de retos no enfrentados por satélites convencionales o por los dispositivos MEMS en Tierra. Algunos dispositivos MEMS como motores miniatura o resonadores, son activados electrostáticamente. Si uno de ellos es expuesto a una órbita de alta radiación ionizante, la carga puede incrementarse y evitar la correcta operación, entonces para MEMS destinados al espacio deben diseñarse trayectorias de dispersión para disipar el exceso de carga. También para prevenir sobrecalentamiento debe existir un camino para expulsar el calor sobrante.

Todo esto añade un nuevo requerimiento para los satélites basados en MEMS: un nuevo tipo de diseño. Lo más difícil es el diseño mecánico y la integración con los diseños electrónicos. Muchos diseñadores de MEMS no saben nada de satélites y muchos ingenieros no saben nada sobre MEMS, el objetivo es formar capital humano especializado en esta tecnología emergente capaz de hacer diseños, pruebas, empaques, manufactura y desarrollo de MEMS, por medio de tecnología de micro fabricación, si se logra un progreso en los diseños y en la tecnología, constelaciones enteras de satélites podrían intensificar las comunicaciones dentro de las próximas décadas. Mejor aún, cuando algo vaya mal en una misión a Marte por ejemplo, se podrán mandar inspectores hacia fuera para echar un vistazo, gracias a estas delgadas y pequeñas máquinas mecánicas.

La tecnología de sistemas microelectromecánicos tiene aplicaciones en varios sectores: energético, industrial, automotriz, salud, ingeniería, sistemas computacionales, biomedicina, telecomunicaciones, entre otros, y el objetivo del Centro MEMS, aparte del desarrollo de microtecnologías, es propiciar la interacción entre investigadores, catedráticos, empresarios y gobierno, para elaborar el diseño y los prototipos que la industria demande

En la Facultad de Ingeniería se instaló el Centro MEMS, con una red integrada por la UNAM, el *Cinvestav*, el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, el ITESM campus Monterrey, y las universidades Autónoma de Ciudad Juárez y de Guadalajara, coordinados por la Fundación México-Estados Unidos para la Ciencia. Además de las diversas aplicaciones de los MEMS, se espera que las nuevas generaciones de Satélites Mexicanos puedan basarse en dicha tecnología.

Además de las ganancias en volúmenes de producción y precios finales más bajos, la tecnología MEMS, misma que incluye tarjetas flexibles de circuitos impresos, permitirá la creación de dispositivos más pequeños con un número aún mayor de funciones.



**Fig. 7.9** Visión artística de un satélite basado en MEMS



## CAPÍTULO 7

El uso de los satélites en México se ha limitado a ofrecer servicios de fines comerciales, de seguridad nacional y de entretenimiento como la televisión por cable. Actualmente un uso prioritario de los satélites mexicanos son las redes de conectividad para centros comunitarios para diversos servicios, utilizadas para comunicar a comunidades aisladas y marginadas, con ello se evita la instalación de postes y cables, antenas de microondas y repetidores. También es un recurso tecnológico que se aplica en servicios de telemedicina y telemedición.

Sin embargo, el desarrollo satelital en otros países demuestra que aún existen diferentes tecnologías y aplicaciones para los satélites y que aún no han sido implementados en México, es de suponer que los países del primer mundo nos llevan la delantera en este campo, sin embargo es parte de nuestra tarea mantenernos actualizados y ofrecer servicios basados en tecnologías vanguardistas, que satisfagan las necesidades de los usuarios, y que tengan la disponibilidad de capacidad suficiente para las redes de seguridad nacional y cobertura de carácter social.

En los últimos años se han otorgado concesiones a sistemas satelitales extranjeros para explotar los derechos de emisión y recepción de señales de bandas de frecuencias asociadas a dichos sistemas, lo que representa una fuerte competencia y a la vez un enorme compromiso para el sistema satelital mexicano, por lo que debemos contar con servicios satelitales eficientes, con amplia cobertura y competitivos internacionalmente.

El importante avance cualitativo que en los próximos años experimentarán las tecnologías y sistemas satelitales como resultado de las actuales tendencias en la investigación y desarrollo en este campo, se podrá materializar en cuatro campos que son:

- Elevación de potencias de transmisión y mayor complejidad de las antenas de los satélites, que darán pie a la proliferación de antenas de tamaño muy reducido en las estaciones terrestres.
- Utilización de bandas de frecuencias cada vez más elevadas como vía para la disponibilidad de mayores anchos de banda y, en consecuencia, de mayores capacidades de transmisión.
- Amplia utilización de procesadores de señal y equipos de conmutación a bordo de los satélites, que harían de estos verdaderas centrales de conmutación y no simple repetidores.
- Utilización de enlaces directos de transmisión entre satélites mediante haces láser muy estrechos, que podrán mejorar la operatividad y conectividad de las redes de satélites en comunicaciones mundiales y eliminar la necesidad de múltiples saltos Tierra-Satélite.

En definitiva, el tradicional concepto de satélite repetidor dará paso a verdaderos satélites inteligentes, integrados en la red digital global y capaces de soportar la transmisión directa de señales digitales con una multiplicidad de servicios. Estos satélites inteligentes estarán conectados entre sí, constituyendo nodos y subredes de la red global e incorporarán, por ejemplo, diferentes antenas orientables (hacia la Tierra, hacia otros satélites) y con haces

reconfigurables de cobertura variable en perfil y extensión, con distribución flexible de la potencia entre los diferentes haces.

En este capítulo explicaremos algunas de las tendencias de los sistemas satelitales de comunicación en la órbita geoestacionaria, que engloban los conceptos expuestos anteriormente y que además marcarán el rumbo de desarrollo de los satélites mexicanos.

## **7.1 Tecnologías en el mundo**

### **7.1.1 Sistemas que ofrecen servicio fijo**

El servicio fijo se refiere a la existencia de un satélite o una flota satelital y las estaciones terrenas con las que intercomunican, dichas estaciones permanecen fijas en el lugar originalmente designado, la mayoría de ellas operan en la modalidad de servicio fijo el cual abarca la transmisión y recepción de datos, radio, telefonía y televisión. Satélites de empresas como Satmex, INTELSAT y Panamsat proporcionan esta clase de servicios.

Como se ha venido mencionando al lo largo de este trabajo, Satmex es una empresa en su mayoría mexicana, fusionada con el gobierno mexicano y la empresa Loral, que cuenta con una flota satelital de 3 satélites: Solidaridad 2, Satmex 5 y próximamente Satmex 6 juntos estos satélites ofrecen servicios como:

Conexión a internet, telefonía rural y de larga distancia, el mejor aliado para enlazar localidades aisladas, televisión y radio, educación a distancia como la red Edusat, redes empresariales y videoconferencia. Por ejemplo, en cajeros automáticos o redes corporativas. Telemedicina, primer programa de salud pública del mundo, producido por el ISSSTE. Además de servicios multimedia, redes privadas de voz y dato, sistemas VSAT's, servicios ocasionales, telefonía internacional, televisión corporativa, televisión directa al hogar y televisión por cable.

En el caso de los Satélites controlados por Satmex, las operaciones de rastreo, telemetría y mando se llevan a cabo desde el Centro de Control Iztapalapa, México, y desde el de Control Alterno de Hermosillo, Sonora.

Satmex vende frecuencias dentro de un rango de 500MHz. Este rango lo divide en "x" número de pedazos dando por resultado los canales. Los usuarios deben tener su propio Telepuerto (Carrier) y antenas. Ellos mismos se encargan de subir la señal con su equipo. Satmex ofrece una gran variedad de servicios de transmisión de señales de diferente naturaleza, que cubren una amplia gama de necesidades de telecomunicación en el mercado continental.

Por su parte, INTELSAT es el mayor proveedor de servicios de comunicaciones por satélite del mundo. Es una organización internacional formada por mas de 130 naciones miembros, que actúan de acuerdo a principios comerciales. Tiene más satélites operativos que cualquier otra organización comercial: una flota de más de 20 satélites de alta potencia, técnicamente avanzados en órbita geoestacionaria. En los próximos años serán lanzados trece satélites más. Estos dispositivos representan cuatro generaciones de avances técnicos

y progreso. INTELSAT proporciona cuatro grandes servicios principalmente, para usuarios en más de 200 países, en todos los continentes, dichos servicios son: servicio público de telefonía conmutada, línea privada (red de servicios para negocios), servicios de retransmisión (audio y video), servicios nacionales y regionales.

INTELSAT establece una serie de estándares para las estaciones terrestres que cualquier usuario de INTELSAT debe cumplir. Miles de estaciones terrenas de diversos tipos, acceden al sistema INTELSAT. Debido a su extensos recursos de satélites y espectro de uso, INTELSAT ofrece una conectividad global única, con la posibilidad de unir dos o más puntos en cualquier lugar del mundo. INTELSAT es una de las primeras organizaciones que proporcionaron una extensa cobertura global de satélites y conectividad para un amplio abanico de servicios de telecomunicaciones.

Otra organización muy importante es Panamsat que ofrece una variedad de servicios de telecomunicaciones que hoy en día, se adaptan al mundo de los negocios internacionales. Posee un sistema global de 25 satélites para facilitar una gran variedad de servicios de comunicaciones, bien sean domésticas en Estados Unidos o en el extranjero. Muchas empresas de telecomunicaciones con sede en los Estados Unidos, Latinoamérica, África y Asia utilizan la capacidad satelital internacional de Panamsat por su capacidad satelital de última tecnología. El sistema global de alta potencia permite la implementación de portadoras de alta velocidad utilizando antenas pequeñas de bajo costo.

Actualmente Panamsat opera con 19 satélites, cada uno está especialmente diseñado para cubrir las necesidades de los clientes, proporcionando la máxima flexibilidad en potencia y cobertura. Tiene en funcionamiento en su sistema de satélites 530 transpondedores, de los cuales 290 están operativos en la banda C y otros 320 en la banda Ku. Para el 2001, Panamsat contaba con una disponibilidad de 900 transpondedores.

Finalmente mencionaremos a Eutelsat cuya flota satelital conformada por 18 satélites (hasta el 2001) geoestacionarios, es considerada como una de las más grandes a nivel mundial, es una organización europea que ofrece servicios públicos de telefonía, transmisión de datos, televisión esencialmente. Originalmente fue creada para satisfacer las necesidades de la comunidad europea, sin embargo extendió sus servicios hacia el Medio Oriente, África, el sudeste de Asia, Rusia e inclusive en América del Norte y del Sur. En los últimos dos años se lanzaron seis satélites más conformando una flota de 24 satélites.

### **7.1.2 Satélites de Banda Ancha**

El constante crecimiento de las telecomunicaciones mundiales ha demandado servicios de mayor velocidad que los que actualmente se ofrecen, esto lleva consigo la utilización de un espectro de frecuencias más amplio, aunado a que las actuales bandas satelitales C y Ku están demasiado saturadas, se han comenzado a desarrollar aplicaciones de transmisión de voz, datos y video en tiempo real, acceso a internet, videotelefonía entre otras, utilizando la banda Ka que al igual que la banda Ku permite el uso de pequeñas terminales. En este capítulo hablaremos de algunos avances en la banda Ka desarrollados actualmente.

*Sistema WildBlue*

Hoy en día, Internet móvil es una tecnología de vanguardia que en México se ofrece por medio de antenas colocadas a través de la red de telefonía celular, que proporciona servicios como páginas WEB, correo electrónico, foros de discusión, chats y mensajes emergentes, vía su propio teléfono celular. A corto plazo, se prevé que Internet también se apoyará en la tecnología satelital, la cual ya ha sido desarrollada y tiene una frecuencia de transmisión más alta, 100% digital. Sin embargo, el costo de este tipo de aparatos es muy alto por lo que aún no está accesible para la población. Más adelante, cuando los precios disminuyan para los usuarios finales será usada para Internet móvil, esto debido al costo del desarrollo. Mientras tanto, en México éste sigue siendo un servicio terrestre basado en antenas. No obstante en Estados Unidos se ofrecerá este servicio a través del sistema WildBlue

Para este servicio se lanzará en el segundo trimestre del 2004 el satélite Anik F2 construido por la empresa Boeing. Por su parte Space Systems Loral recientemente anunció la construcción de su satélite WildBlue-1 el primer satélite comercial dedicado a la banda Ka de banda ancha para la compañía. Éste representará el segundo satélite para la empresa WildBlue la cual recibió una inversión por parte de INTELSAT de varios millones de dólares para su construcción y que entrara en operación a principios del 2004. Sin embargo, este satélite se lanzará de acuerdo a las demandas de los consumidores

El servicio ofrece una conexión a internet de alta velocidad para una casa o una oficina completa, hasta 25 veces mejor que la que actualmente ofrece un módem convencional de 56K. El usuario solo necesitará un módem pequeño para la conexión y un disco parecido al de televisión directa al hogar de tan solo 66cm. con el cual tendrá comunicación bidireccional con el satélite. También pretende ofrecer velocidades para bajar información desde internet de 1.5 Mbps y de 256 Kbps para subirla a la red. Todos los paquetes WildBlue incluirán e-mail y espacio en la red además de otros servicios de ISP sin costo adicional.

WildBlue planea explotar la banda Ka (20-30 GHz) usando satélites geoestacionarios, esto permitirá un acceso a internet de cobertura nacional con un solo satélite. Estos satélites ofrecerán asignación bajo demanda para los consumidores. Para ofrecer este servicio sin importar la región en donde el usuario se encuentre, WildBlue utiliza un gran número de pequeños haces puntuales, en lugar de un solo cono de cobertura continental, con esto se espera cubrir a ciudades pequeñas y zonas rurales. Este servicio está orientado a un mercado de aproximadamente 30 millones de hogares en los Estados Unidos que no tienen acceso a servicios de cable.

La instalación de los discos se lleva a cabo por el personal especializado de la empresa quienes eficientemente instalarán y activarán el servicio de banda ancha WildBlue debido a que la dimensión de los mismos (66cm x 69cm), facilita su implementación en el techo de los hogares u oficinas, un cable desde el disco se conectará al módem satelital (pequeña caja situada al lado de la computadora) la cual la conectará vía Ethernet. No se permitirá que los usuarios realicen esta instalación, ya que se debe asegurar el correcto apuntamiento del disco hacia el satélite y que las conexiones ser realicen apropiadamente, por lo cual solo el personal especializado podrá hacerlo. Para este servicio no se requerirá una línea

telefónica ya que como se mencionó WildBlue en un servicio de internet inalámbrico bidireccional.

### *Spaceway*

Spaceway es el siguiente gran paso de Hughes para proveer a sus clientes las soluciones más innovadoras en la comunicación satelital, está planeado que ofrezca sus servicios en Norteamérica para el 2004. es un sistema satelital de nueva generación cuyas capacidades permitirán habilitar aplicaciones terrestres, abrir nuevos mercados y desencadenar un gran cantidad de servicios de forma directa en banda ancha y aplicaciones multimedia de alta velocidad

Este sistema opera en la banda Ka, tiene un alto desempeño, ya que cuenta con procesamiento digital a bordo, conmutación de paquetes y tecnología de haces puntuales de cobertura para ofrecer conectividad particular sin importar la ubicación. Con Spaceway los usuarios y eventualmente los consumidores de grandes negocios, los proveedores de servicios de telecomunicaciones, oficinas pequeñas, oficinas en casa tendrán acceso a las aplicaciones de banda ancha como telemedicina, videoconferencia, educación a distancia interactiva a grandes velocidades a un costo más accesible que los ofrecidos por sistemas terrestres convencionales como Frame Relay\*. Spaceway se integrará a los existentes servicios basados en tecnología local y redes de cobertura ancha y será completamente compatible con el amplio rango de estándares industriales. Su arquitectura permitirá a los usuarios comunicarse directamente vía satélite sin conectarse a través de un servicio de retransmisión o hub. Basado en asignación de ancho de banda bajo demanda, significa que los usuarios solo pagarán por el ancho de banda que su aplicación requiera ya sea de transacciones de datos de baja velocidad, transmisiones de varios megabits o video intensivo.

Su constelación estará basada en dos satélites de alta potencia HS 702 de la empresa Boeing Satellite Systems.

### **7.1.3 Satélites de servicio móvil de banda angosta**

En las redes de comunicación de servicio móvil o MSS (Mobile Satellite Services), a diferencia de las de servicio fijo, la posición de al menos uno de los extremos de la comunicación está indeterminada.

Cerca del 90% de la superficie de la Tierra, están fuera del alcance del cableado y de las redes de telecomunicaciones convencionales, por lo que se hace necesaria la utilización de un sistema de satélites que facilite las comunicaciones a la gente que viva, trabaje o viaje por lugares remotos de la Tierra. También, más del 50% de la gente de la Tierra se encuentra "incomunicada", ya sea por su ubicación geográfica o porque no cuentan con un servicio de telecomunicación. Aquí es donde aparece INMARSAT, que permite desde enlaces de alta velocidad en operaciones de minería remotas, hasta controlar las maniobras de rescate en algún accidente marítimo.

INMARSAT (International Maritime Satellite Organization) es una organización internacional creada en 1979 que opera un sistema mundial de comunicaciones móviles por

satélite. En un principio, se fundó para mejorar las comunicaciones marítimas con objeto de incrementar la seguridad en el mar. Actualmente, además de suministrar servicios de telefonía y transmisión de datos a embarcaciones y plataformas marítimas, aporta también servicios para la comunidad aeronáutica y para los móviles terrestres. Hoy en día 79 países son miembros de los cuales Estados Unidos cuenta con la mayor parte (alrededor de un 23%), seguido del Reino Unido y Noruega.

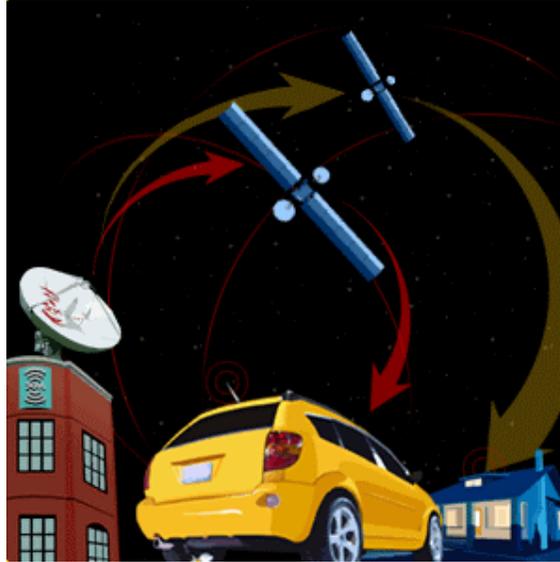
INMARSAT (así como otras organizaciones que proveen comunicaciones globales vía satélite) sienta las bases para el desarrollo y el crecimiento económico de todo el mundo. Además, con el lanzamiento de su tercera generación de satélites, que incorpora lo último en comunicaciones digitales y tecnología multihaz, así como el desarrollo del proyecto ICO de telefonía móvil vía satélite, Inmarsat permitirá establecer comunicaciones desde cualquier punto de la superficie terráquea.

Del total de los 79 países que componen Inmarsat, diez corresponden a Hispanoamérica y a los países del Caribe. La inversión que representan estos países dentro de la organización es del 2.5%. Además, Argentina, Brasil, Colombia, Cuba y México también han invertido directamente en la compañía ICO (encargada de desarrollar un proyecto de telefonía móvil vía satélite )

La constelación INMARSAT consta de 5 satélites de la tercera generación que son administrados desde su centro de control principal ubicado en Londres. Estos satélites utilizan la banda L (1.53-2.7 GHz) para terminales móviles en enlaces de subida y bajada y la banda C para terminales terrestres (telepuertos).

#### **7.1.4 Sistemas de radio digital**

Mientras que la televisión dio un paso adelante rumbo a la tecnología digital, la radio ha permanecido estancada en la tecnología analógica, sin embargo en los Estados Unidos se está desarrollando la transición al sistema de radio digital. Dicha conversión ofrece demasiados beneficios que no están disponibles en los sistemas AM y FM, A pesar de que una buena señal de FM sintonizada en una estación terrestre es comparable con la calidad de un CD, en un receptor móvil (el típico de un vehículo), la calidad del sonido comienza a degradarse debido las imperfecciones del canal que experimenta una señal de FM. Por eso se ha pensado en la tecnología digital para radiodifusión móvil. Lo mismo le sucederá a las frecuencias de AM en cuyo caso la diferencia en la calidad del sonido será más marcada y será comparable con la calidad de FM actual. Adicionalmente la tecnología digital incrementará la robustez de la radio terrestre debido a la habilidad de las señales de resistir a factores como la interferencia, y el ruido del ambiente. La robustez digital también funciona bien contra la interferencia de señales de radiodifusoras cercanas, otra razón un poco menos tangible de esta transición al mundo digital es la percepción del consumidor. La radio terrestre es una de los pocos servicios de comunicaciones analógicas ofrecidos en un mundo cada vez más digital. Dos de los principales sistemas que ofrecerán radio digital SDARS (Satellite Digital Audio Radio Services) en Estados Unidos son: el sistema denominado XM Radio y Sirius Satellite Radio.

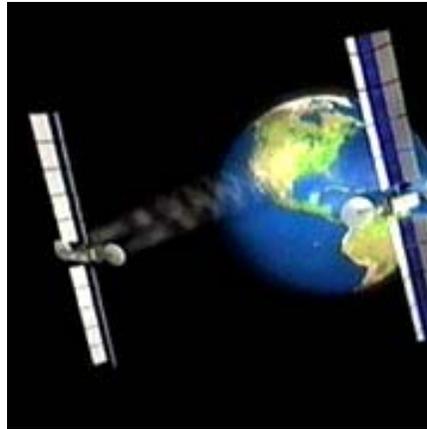


**Fig. 7.1** Sistema de Radio Digital

Ambos sistemas comparten numerosas similitudes como el mismo número de canales separados de radio. Así mismo tienen diferencias importantes, la más marcada es la configuración orbital de sus satélites y sus planes de suscripción y cobro.

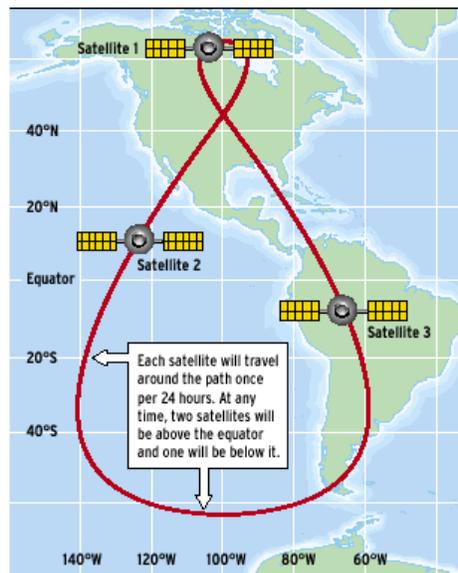
XM radio tiene una constelación de 2 satélites geostacionarios construidos por Boeing denominados Rock and Roll (Fig. 7.2) mientras que Sirius tiene 3 satélites colocados en una órbita elíptica (Fig. 7.3) donde cada satélite tiene un ciclo de 16 horas. XM radio planea incluir mensajes de suscripción en su programación con fines de financiamiento, mientras que Sirius planea ser comercialmente gratuito. En ambos sistemas el alcance es lo más importante el mercado de radio, principalmente el rural actualmente no atendido por los servicios existentes, no dudaría en aceptar los beneficios ofrecidos por la radio satelital. Los proveedores del servicio son optimistas y planean captar un mercado cada uno mayor a 4 millones de usuarios lo cual es posible en un país con una población de 300 millones. Técnicamente los sistemas Sirius y XM radio son únicos en muchas formas porque estos sistemas están diseñados para servir primordialmente a usuarios móviles y donde los receptores individuales deben costar mucho menos que cualquier receptor satelital antes construido.

XM radio ofrece 68 canales gratuitos de música, 32 canales de noticias, deportes y entretenimiento y 21 canales de servicio instantáneo de tráfico y clima por tan solo 9.9 dólares al mes. Sirius tiene 50 canales de música y 50 de noticias y entretenimiento.



**Fig. 7.2** Satélites Rock and Roll de XM radio

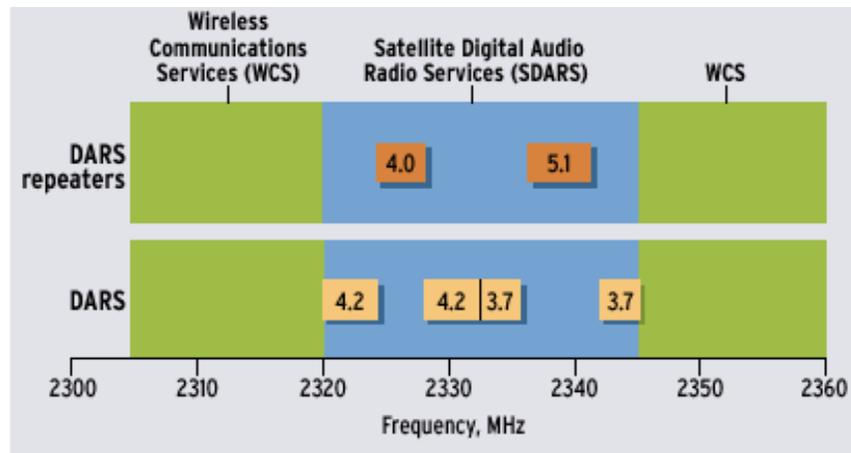
XM ha implementado un sistema de diversidad espacial que funciona como una especie de redundancia , este arreglo reduce la probabilidad de que la señal del satélite sea completamente bloqueada para el receptor, ( Sirius también utiliza la diversidad espacial pero de forma distinta). Bajo circunstancias ideales un receptor verá a los dos satélites y estará constantemente recibiendo y procesando las señales de los dos, pero en caso de que un obstáculo bloquee la señal de alguno, el otro seguirá enviando la información para no interrumpir el servicio. Las dos formas de diversidad utilizadas en ambos sistemas, son diversidad de frecuencias y diversidad de tiempo la cual introduce un poco de retraso al sistema. En el sistema Sirius la movilidad constante de los satélites trae consecuencias operacionales debido a que solo dos de los tres satélites podrán transmitir en un tiempo determinado, de otra forma tendrían que transmitir en la misma banda de frecuencias lo que causaría interferencia entre ellos. Para evitar este problema , al mismo tiempo que en que los satélites entran y salen de la zona de cobertura debe ocurrir un hand off es decir que un satélite cese la transmisión mientras que el otro la inicia, lo cual causará una interrupción del orden de milisegundos en el receptor, sin embargo mientras el tercer satélite no esté bloqueado durante este hand off , para el usuario, la interrupción pasará inadvertida.



**Fig. 7.3** Constelación de Satélites Sirio

Ambos sistemas utilizan una red de estaciones terrestres para retransmitir la señal del satélite cuando pase por áreas de difícil alcance como túneles y cañones. Estos repetidores terrestres utilizan una técnica de modulación diferente a la que utilizan los satélites, siendo optimizada para uso de transmisores terrestre, llamado multiplexión por división de código ortogonal de frecuencia COFDM contra la QPSK usada en los satélites.

La distribución del espectro para SDARS (25 MHz) está repartido como sigue: de (2320-2332.5 MHz) para Sirius y de (2332.5 – 2345 MHz) para XM radio según se muestra en la siguiente figura:



**Fig. 7.4** Espectro de Frecuencias para XM radio y Sirius

Por su parte ya existen receptores usados para el SDARS contruidos por las marcas Pioneer , Alpine y Sony la cual cuenta con un sistema “quitapón” para el auto y la casa para el sistema XM. Un estéreo de auto para XM radio costará alrededor de 150 dólares más que un sistema AM/FM estándar. Por su parte, Sirius con las marcas Kenwood, Panasonic, Clarion y Alpine entre otras, hizo una alianza con las marcas de autos, Ford, Chrysler, BMW, Mercedes, Jaguar y Volvo para instalar radios (AM/FM/SAT) aunque todavía no se han mencionado precios pero se estima que sea entre 300 y 500 dólares.

### 7.1.5 Enlaces entre Satélites ISL

Ocasionalmente, hay aplicaciones en donde es necesario establecer comunicación entre satélites. Esto se realiza usando enlaces cruzados entre satélites o enlaces intersatelitales (ISL)\*. Una desventaja de usar un ISL es que el transmisor y el receptor son enviados ambos al espacio. Consecuentemente, la potencia de salida del transmisor y la sensibilidad de entrada del receptor se limitan.

La conveniencia de utilizar ISL's se fundamenta en las ventajas que ofrecen, por una parte, la posibilidad de encaminar el tráfico de larga distancia a través de estos enlaces, dota de autonomía al sistema, reduce los inmensurables costos de los enlaces PTSN (debido a que dependen de la orografía del terreno ) y reduce el retardo de propagación. Además , se puede dar servicio a amplias zonas en las que el satélite no puede ver ningún punto de enlace. ( por ejemplo , en el Océano Pacífico ). Generalmente , los requerimientos del handover\*\* pueden verse reducidos gracias a que el enlace con un determinado punto, puede mantenerse mientras un determinado usuario móvil permanezca en la zona de servicio de un determinado satélite. En cambio, sin ISL's , el satélite tiene que ver simultáneamente el punto de enlace y el usuario móvil. Finalmente, es importante mencionar que los ISL's permiten transportar señalización e información para la administración de la red.

Por otro lado, la introducción de los ISL's también incluye un cierto número de inconvenientes, como el peso adicional, la complejidad y el costo de la carga útil del satélite. En efecto, se requieren antenas ISL, transmisores y receptores, así como dispositivos de conmutación abordo. Las necesidades de apuntamiento, adquisición y seguimiento ( PAT )\*\*\* incrementa todavía más la complejidad ya que requieren antenas ISL orientables ( además de las antenas GWL).

En general, en los sistemas LEO diseñados para obtener cobertura total , las ventajas compensan ampliamente los inconvenientes. No suele ocurrir lo mismo con los sistemas ICO.

De acuerdo al tipo de conexión, se distinguen dos tipos de ISL's :

- ISL intraplanos : conectan satélites de un mismo plano orbital.

Los ISL's intraplanos pueden mantenerse con antenas fijas. Dentro de este grupo podemos mencionar enlaces entre satélites de órbita baja, es decir, LEO-LEO o de órbita geoestacionaria GEO-GEO.

- ISL interplano : conectan satélites de planos orbitales diferentes.

Dos satélites de planos orbitales diferentes se ven el uno al otro con un ángulo de apuntamiento variable. Así pues, los ISL's interplanos requieren generalmente antenas

---

\* de sus siglas en inglés Inter-Satellite Link

\*\* handover, término que se utiliza para la conmutación o cambio de una frecuencia a otra.

\*\*\* de sus siglas en inglés Pointing, Acquisition and Tracking

orientables Aún es más, los ISL's interplano no tienen por qué mantenerse indefinidamente.

La distancia entre dos satélites de planos orbitales adyacentes varía sensiblemente a medida que éstos se desplazan por su órbita, pudiendo darse el caso de que la tierra se interponga en su línea de vista. Cuando se dan estas situaciones, el enlace debe tener la posibilidad de conmutar ( activo / inactivo ) lo que exige un enorme esfuerzo de apuntamiento, adquisición y seguimiento (PAT). Tal es el caso de los enlaces de orbita baja LEO, con un satélite geoestacionario GEO donde el enlace sería LEO-GEO un enlace de este tipo es experimentado por la Agencia Espacial Europea con su sistema SILEX que se refiere a enlaces intersatelitales con terminal láser-óptica para comunicaciones.

Actualmente se están desarrollando nuevas tecnologías para los ISL's como la utilización de láseres ópticos para la intercomunicación, cuyas principales ventajas serían una mejora

en el ancho de banda, la utilización de antenas de reducido tamaño y efectos de dispersión nulos. Muchas empresas de prestigio manejan proyectos de enlaces intersatelitales tanto de microondas como ópticos que posiblemente entrarán en función en fechas no muy lejanas.

## **7.2 Posibles implementaciones en los próximos satélites mexicanos**

### **7.2.1 Sistemas Microelectromecánicos (MEMS)**

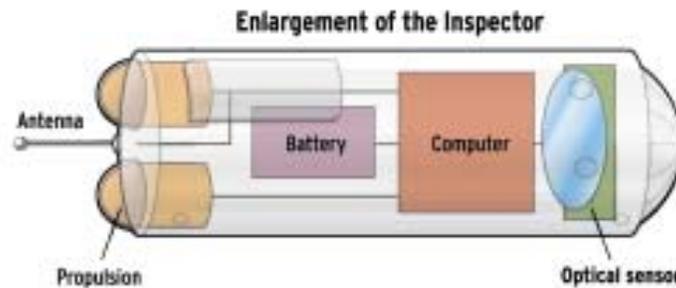
La industria satelital podría experimentar la más grande revolución en su historia gracias a algunas de las máquinas más pequeñas en existencia. Los investigadores en este campo han desarrollado experimentos diseñados para convencer a la industria aeroespacial de que los sistemas microelectromecánicos (MEMS), podrían abrir las puertas hacia una producción en masa de satélites a bajo costo y de alta confiabilidad. La tecnología MEMS permite juntar dispositivos electrónicos con micromáquinas, haciendo posible tener todo un sistema en un solo chip.

Los MEMS combinan la electrónica convencional de semiconductores con transmisores, niveladores, acelerómetros, diafragmas, controladores de calor, propulsores microfluídicos, todos ellos microscópicos en tamaño. Se pueden hacer arreglos completos de cosas con los MEMS que no podrían ser hechos de otra forma. Todos los satélites requieren un conjunto básico de subsistemas para hacer un trabajo eficiente cuando se encuentren en órbita, la mayoría los hemos mencionado en los primeros capítulos como el subsistema de potencia, de comunicaciones, de propulsión etc. Si todas estas funciones pueden ser desempeñadas por MEMS entonces podemos empezar a pensar en fabricar subsistemas satelitales como se fabrican hoy en día los chips para teléfonos o laptops. Los satélites pueden ser construidos por diafragmas apilados cubiertos por MEMS y componentes electrónicos. El resultado podría ser un satélite de 1Kg. o picosatélite que podría ser producido en grandes cantidades, de esta forma se construirían constelaciones con cientos de ellos. Dichos satélites teniendo requerimientos insignificantes de masa, tamaño y potencia, pueden ser fácilmente empacados en un satélite convencional o lanzados usando vehículos lanzadores de menor tamaño y costo. Algunas de las ventajas de usar satélites basados en tecnología MEMS son precisamente los menores costos de lanzamiento y la alta resistencia a la radiación y a la vibración. El costo de colocar un satélite en órbitas bajas LEO es de alrededor 10 000

dólares por Kg. claramente, el lanzamiento de satélites más pequeños y ligeros costarán mucho menos. También prometen tener un menor costo de desarrollo y fabricación que los satélites convencionales. Robustez es también pieza clave, es decir, los MEMS son mucho más resistentes a los daños por radiación y son capaces de operar confortablemente en ambientes de muy alta radiación como los cinturones de Van Hallen, éstos ocupan una región del espacio entre las órbitas LEO y la congestionada órbita GEO. Potencialmente esta región no ha sido explotada debido a las dificultades prácticas y sobre todo económicas de colocar satélites convencionales en esa zona protegidos contra tal cantidad de radiación. Entonces, los MEMS tienen resistencia a grandes niveles de vibración e incluso a choques con un cohete.

La razón por la cual los dispositivos basados en MEMS soportan este tipo de fuerzas mucho mejor que los dispositivos de tamaño convencional es claro, la masas de cada componente móvil es extremadamente pequeño, entonces las fuerzas internas potencialmente dañinas entre los componentes son también muy pequeñas.

Sin embargo, la primera aplicación de satélites miniatura basados en tecnología MEMS no será como la de un satélite independiente de larga vida útil ni tampoco la de una constelación, sino más bien la de un dispositivo inspector de corta vida. Un inspector consistiría de una batería, una computadora de control, una pequeña unidad de propulsión y algunos sensores ópticos o de otro tipo como un detector infrarrojo (Fig. 7.5). Éste se comunicaría inalámbricamente con su satélite.



**Fig. 7.5 Imagen alargada de un inspector**

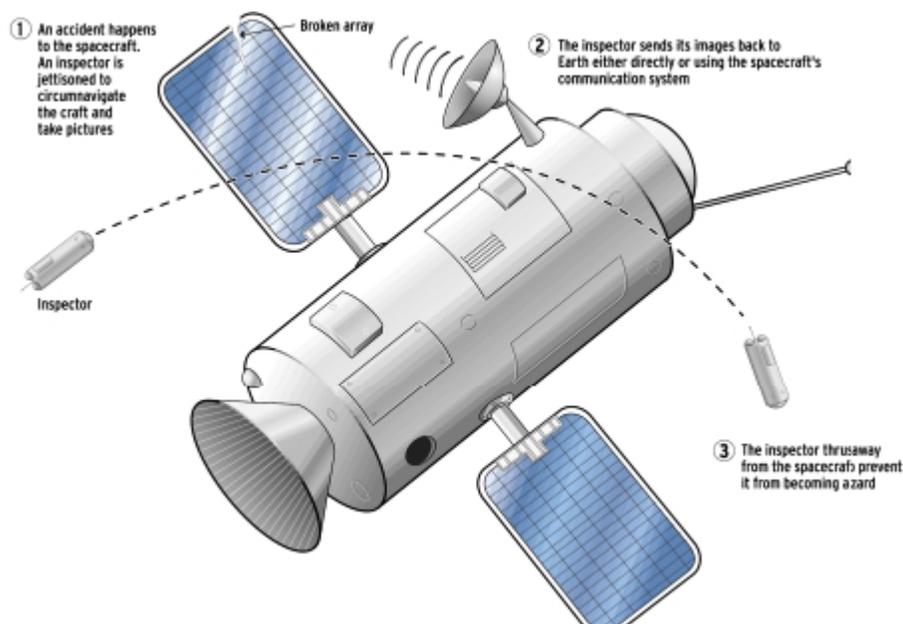
Cuando un satélite funciona mal, se hace un gasto de tiempo y energía para determinar qué fue lo que pasó y adivinar su estado actual. Este esfuerzo podría reducirse si estuviesen disponibles una fotografía o dos del daño, para los controladores en tierra, esto gracias a un inspector. Los inspectores podrían jugar un papel muy importante durante la construcción de la Estación Espacial Internacional, y como esta larga estructura está destinada a degradarse con el tiempo, los inspectores serán una necesidad. Cada satélite podría cargar uno o dos inspectores de escasos 250 gramos, los cuales podrían permanecer pasivos hasta que se necesitasen. Si se presenta una anomalía, podrían salir para el reconocimiento (Fig. 7.6)

De la figura observamos que el punto número 1 es cuando el inspector se dispara para circunnavegar y tomar las fotografías cuando ocurre una falla, en el paso 2 manda las imágenes de regreso a la Tierra ya sea de forma directa o utilizando el sistema de

comunicaciones del satélite y, finalmente en el paso 3 el inspector es expulsado del satélite para evitar convertirse en un peligro.

El satélite SNAP-I construido por la universidad de Surrey en Inglaterra fue lanzado en junio del 2000 a bordo de un satélite ruso, a pesar de que el diseño miniatura no utilizaba MEMS, su misión fue la de validar el concepto de inspector que permitiría observar el desempeño del satélite y la video telemetría. Los satélites de la universidad de Surrey pretenden usar tecnología MEMS en futuros microsátélites.

Sin embargo esto no sucederá tan pronto, ya que hay un largo camino por recorrer antes de que todas las funciones de un satélite puedan ser duplicadas por componentes basados en sistemas microelectromecánicos. El más grande reto que han enfrentado los picosatélites es el mismo que enfrenta la tecnología MEMS: la de mantener un alto grado de capacidad bajo severas restricciones de tamaño, masa y potencia, se necesita alta ingeniería para probar que los dispositivos microelectromecánicos pueden funcionar adecuadamente en el espacio. Cada subsistema debe demostrarse en la práctica. Para este fin, ingenieros de la industria aeroespacial, han comenzado programas de desarrollo para un ambicioso satélite que involucra una secuencia de misiones de prueba. Inicialmente los investigadores solo querían mandar algunos switches MEMS experimentales diseñados para el switcheo de señales de radiofrecuencia. Así mismo se dieron cuenta de que lo más conveniente para probar estos dispositivos era hacerlo con una plataforma miniatura de prueba y no montados sobre naves espaciales convencionales.



**Fig. 7.6 Funcionamiento del inspector**

Los experimentos realizados con MEMS dependen directamente de la madurez de la tecnología y los avances disponibles en esta área.

Otros picosatélites experimentales son el llamado OPAL, operado por la universidad de Stanford y el MigthySat 2.1 creado por un grupo de tecnología MEMS en Pasadena California. En ambos proyectos se logró demostrar la factibilidad del concepto de inspector así como también se comprobó su habilidad para probar MEMS en el espacio.

El siguiente paso para la industria aeroespacial es colocar subsistemas microelectromecánicos a bordo de picosatélites como componentes funcionales, no solo como dispositivos de prueba. Los siguientes vuelos usarán switches de radiofrecuencia para conmutar antenas en modos de recepción y transmisión y también para probar los giroscopios MEMS del mismo. El giroscopio es un asistente para determinar la orientación del satélite. Los giroscopios tradicionales mantienen un marco de referencia fijo, pero en los basados en MEMS, tres pares de sensores de velocidad y acelerómetros son montados perpendicularmente entre ellos para monitorear los movimientos de la astronave. Pero mientras la tasa de desviación de los giroscopios MEMS son una secuela que no afecta tanto a las misiones tipo inspector de corta vida, la más mínima desviación puede afectar enormemente la habilidad de navegación de los satélites de larga vida basados en MEMS. Una posible solución es usar la red del sistema de posicionamiento global (GPS) para recalibrar periódicamente el giroscopio. Después de esto los elementos ópticos basados en sistemas microelectromecánicos, como cámaras miniatura y sensores infrarrojos son seguidos por un sistema microfluídico para propulsión básica. Aquí tanques pequeños sumergidos en una capa de silicón y cubiertos por otra capa de silicón podrán soportar pequeñas cantidades de propelente. Los canales microfluídicos guiarían el fluido hacia una boquilla donde será acelerado para proporcionar empuje. Entre las propuestas sugeridas están: membranas vibrantes, una turbina de gas de 1cm de diámetro y propelentes ionizados acelerados eléctricamente.

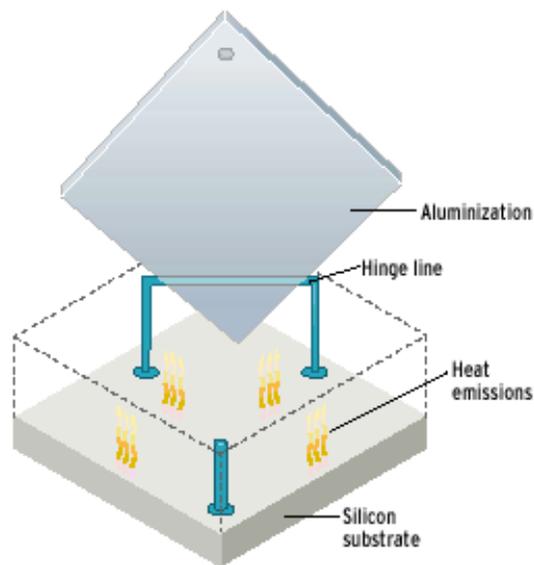
El escape de las válvulas MEM aún cuando están envueltas en esa diminuta cantidad de propelente, inclusive a bajas tasas de escape, pueden dejar al satélite sin combustible. Pese a estos retos, será posible demostrar la funcionalidad completa de un inspector.

Los subsistemas satelitales basados en MEMS son frecuentemente muy diferentes a sus contrapartes convencionales como lo mostró el giroscopio. Dos de los más importantes sistemas en desarrollo son el de propulsión y el de control térmico.

El control de temperatura es especialmente importante en satélites de órbitas LEO donde sus periodos orbitales varían entre 60 y 100 minutos, probablemente con la mitad de este tiempo directamente orientados a los rayos del sol y la otra mitad bajo la sombra de la Tierra, dependiendo de la órbita precisa. Las temperaturas externas varían enormemente, entonces el satélite se debe prevenir a sí mismo de ser horneado y congelado alternadamente. En satélites convencionales, este problema se puede solucionar con recubrimientos termales que funcionan como escudo y con tuberías que permitan el flujo de calor, sin embargo, un dispositivo que solo pesa algunos gramos necesita una solución diferente.

Para misiones de corta duración el aislamiento es suficiente. Los picosatélites de prueba que se han puesto en órbita, tienen una larga bobina que aísla la conexión de las antenas externas de la electrónica. Los tableros electrónicos y los arreglos de MEMS son aislados de la cubierta de aluminio por medio de soportes de plástico que tienen una forma torcida para aumentar la longitud de la trayectoria que el calor debe seguir.

Los satélites de larga vida, requieren sistemas más complejos. Una opción podría ser cubrir la superficie del satélite con delgadas rejillas de ventilación como se muestra en la figura 7.7 Estas rejillas estarían soportadas por una bisagra por encima de la superficie de silicón, sus cubiertas deben ser de aluminio para reflejar el calor y la luz y la cubierta de silicón con un material de alta emisividad. Cuando se requiere disipar el calor, las rejillas se abren de cara opuesta al sol girando sus bisagras electrostáticamente para exponer la cubierta de alta emisividad. Como el silicón es transparente a la radiación infrarroja, la fuente de calor debajo de la cubierta, radiaría hacia el espacio, lo que enfriaría al dispositivo. También podrían incrustarse canales sobre una cubierta de silicón con una delgada capa para crear tubos de calor miniatura, el metanol podría esparcirse a lo largo de estos tubos para transferir el calor de una porción del satélite a otra.



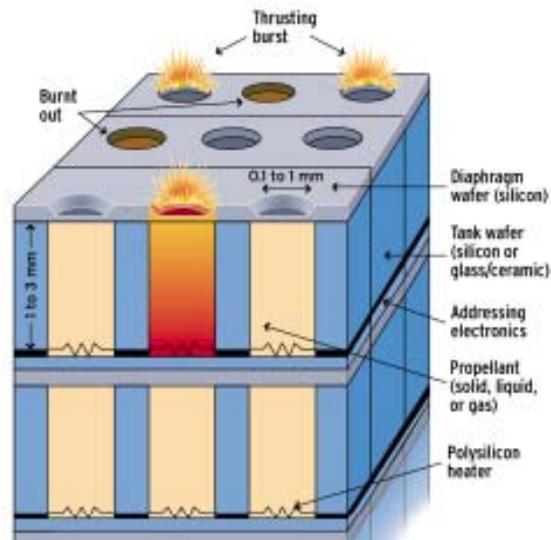
**Fig. 7.7** Rejilla que controla la temperatura del satélite

En cuanto a la propulsión, los satélites necesitan de ella por dos motivos: para moverlos de un lado a otro y para control de posición. Un satélite que no controla su orientación hacia el sol, perdería potencia en sus celdas solares o un satélite que no oriente correctamente sus antenas hacia una estación terrena de terminada o hacia otro satélite es inservible. Generalmente hablando, una vez que el satélite ha alcanzado su órbita deseada, su control de posición se convierte en la principal función del subsistema de propulsión.

Un propulsor digital basado en tecnología MEMS para control de posición, está siendo desarrollado por Aeroespacial TRW y por el Instituto de Tecnología en California. El

propulsor está compuesto por un diafragma de silicón cubierto por una fina rejilla de células individuales que contienen material explosivo. El diafragma se coloca en la superficie externa del picosatélite. Cuando se detonan por medio de un elemento de calor eléctrico, cada célula produce una pequeña explosión que proporciona cierta propulsión. Diferentes patrones de células son encendidas para producir diferentes cantidades de propulsión uniforme alrededor de los ejes del diafragma y usar dicho diafragma tan lleno como sea posible. Para futuras versiones, una vez que todas las células utilizables sean encendidas, el diafragma puede ser desechado para exponer un nuevo diafragma apilado por debajo del anterior. Como se muestra en la figura 7.8

Los usos de impulsores digitales también existirán en largos satélites convencionales. Los satélites largos, usualmente tienen largos arreglos solares fotovoltaicos que alcanzan la potencia que necesitan. En el momento del despliegue dichos arreglos solares tienden a sacudirse de un lado a otro de forma que el satélite completo oscila. Entonces dichos propulsores de un solo disparo, serán capaces de amortiguar estos movimientos. Los movimientos pueden ser medidos por un acelerómetro basado en MEMS y una unidad de control que podrían calcular cuál propulsor se debe encender para neutralizar el movimiento. Los propulsores digitales han sido probados como parte de una nave espacial de sondeo (aquella que sigue una trayectoria de vuelo dentro de o sobre la superatmósfera. Durante el lanzamiento 30 de los 29 propulsores miniatura fueron probados dando resultados satisfactorios.



**Fig. 7.8** Propulsor Digital

Para maniobras orbitales de mayor duración, se pueden usar sistemas de propulsión microeléctrica. Los sistemas de propulsión eléctrica utilizan campos eléctricos para acelerar los iones de metales pesados del satélite empujándolo a la posición opuesta. Son muy eficientes, pero proporcionan bajas cantidades de propulsión. Los satélites largos pueden usarlos sólo en misiones prolongadas como expediciones interplanetarias que permiten que la velocidad se intensifique durante semanas. Pero un satélite de 1 Kg. requiere simplemente entre 1 y 10 milinewtons de propulsión, haciendo la propulsión eléctrica una opción viable para maniobras rápidas.

El pequeño tamaño de estos satélites también significa que refiriéndonos a su tamaño total, el área que colecta potencia solar es más grande que en uno convencional, lo que le da una mucho mejor relación de potencia eléctrica –peso al sistema de propulsión.

Adicionalmente el ambiente espacial muestra una serie de retos no enfrentados por satélites convencionales o por los dispositivos MEMS en Tierra. Algunos dispositivos MEMS como motores miniatura o resonadores, son activados electrostáticamente. Si uno de ellos es expuesto a una órbita de alta radiación ionizante, la carga puede incrementarse y evitar la correcta operación, entonces para MEMS destinados al espacio deben diseñarse trayectorias de dispersión para disipar el exceso de carga. También para prevenir sobrecalentamiento debe existir un camino para expulsar el calor sobrante.

Todo esto añade un nuevo requerimiento para los satélites basados en MEMS: un nuevo tipo de diseño. Lo más difícil es el diseño mecánico y la integración con los diseños electrónicos. Muchos diseñadores de MEMS no saben nada de satélites y muchos ingenieros no saben nada sobre MEMS, el objetivo es formar capital humano especializado en esta tecnología emergente capaz de hacer diseños, pruebas, empaques, manufactura y desarrollo de MEMS, por medio de tecnología de micro fabricación, si se logra un progreso en los diseños y en la tecnología, constelaciones enteras de satélites podrían intensificar las comunicaciones dentro de las próximas décadas. Mejor aún, cuando algo vaya mal en una misión a Marte por ejemplo, se podrán mandar inspectores hacia fuera para echar un vistazo, gracias a estas delgadas y pequeñas máquinas mecánicas.

La tecnología de sistemas microelectromecánicos tiene aplicaciones en varios sectores: energético, industrial, automotriz, salud, ingeniería, sistemas computacionales, biomedicina, telecomunicaciones, entre otros, y el objetivo del Centro MEMS, aparte del desarrollo de microtecnologías, es propiciar la interacción entre investigadores, catedráticos, empresarios y gobierno, para elaborar el diseño y los prototipos que la industria demande

En la Facultad de Ingeniería se instaló el Centro MEMS, con una red integrada por la UNAM, el *Cinvestav*, el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, el ITESM campus Monterrey, y las universidades Autónoma de Ciudad Juárez y de Guadalajara, coordinados por la Fundación México-Estados Unidos para la Ciencia. Además de las diversas aplicaciones de los MEMS, se espera que las nuevas generaciones de Satélites Mexicanos puedan basarse en dicha tecnología.

Además de las ganancias en volúmenes de producción y precios finales más bajos, la tecnología MEMS, misma que incluye tarjetas flexibles de circuitos impresos, permitirá la creación de dispositivos más pequeños con un número aún mayor de funciones.



**Fig. 7.9** Visión artística de un satélite basado en MEMS



## CONCLUSIONES

En los últimos años, la tecnología satelital ha recobrado gran importancia en el terreno de las comunicaciones. El desarrollo de la fibra óptica parecía que iba a obstaculizar la evolución de los satélites de comunicación, como consecuencia de sus características de transmisión como velocidad, capacidad, durabilidad, etc., sin embargo existen diversos retos de comunicación que esta tecnología de fibra óptica debe enfrentar ya sean geográficos, climáticos, y sobretodo financieros. Los satélites artificiales proporcionan cobertura a regiones donde la comunicación por redes terrestres es prácticamente imposible, o sumamente costosa. Por tal motivo los satélites artificiales de comunicación aún se presentan como una buena opción, ya que los costos de inversión son relativamente menores, y el alcance es mayor.

La comunicación satelital permite poner en contacto a personas en lugares muy remotos con centros de desarrollo económico y social a lo largo del continente venciendo así, barreras físicas que aislaban zonas enteras, como desiertos, montañas, océanos, selvas y polos glaciares. La ventaja de utilizar satélites de comunicaciones radica justamente en esta característica, además de que permiten planear su uso a requerimientos reales, acortan los tiempos de instalación y complementan las redes terrestres para transmisiones internacionales, posibilitando el cubrimiento total de la Tierra. Con ellos se pueden establecer transmisiones con equipo móvil desde puntos geográficos donde no existe infraestructura para telecomunicaciones. Algunas desventajas en las transmisiones satelitales es que están sujetas a demoras de propagación, se debilitan con las lluvias intensas, nieve y manchas solares que afectan a las estaciones terrestres, también sufren interferencias de radio, microondas y aeropuertos. Además los costos de fabricación y lanzamiento son muy elevados. Los ahorros de costos una vez que están en órbita, son máximos cuando la distancia entre los puntos excede a 1,800 kilómetros comparados con los de microondas y con los 190 kilómetros de fibras ópticas.

En el caso de México al ser su orografía tan irregular, tan montañosa, se requiere una conectividad satelital para integrar a las comunidades más alejadas de los polos de desarrollo. Satmex reservó dos transpondedores (72 MHz) al sistema e-México para hacer llegar conectividad a las comunidades que hoy no la tienen, tanto urbanas como rurales, con servicios tales como: educación a distancia, telemedicina, servicios sociales y comercio electrónico, entre otros. Asimismo el acceso a Internet, lo que se reflejará en un mejor nivel de vida, facilitando la comunicación entre sus comunidades, con el país entero y con el resto del mundo.

A través de los satélites de Satmex se permite a más de quince mil centros de educación secundaria en México recibir toda su instrucción vía satélite desde lugares muy remotos, sin tener que estar concentrados en la capital del estado o en cabeceras municipales, para llevar conectividad satelital a escuelas primarias y secundarias rurales, beneficiando con ello alrededor de 150 mil niños, lo que trae consigo un beneficio en educación muy importante. El hecho de poder conectar clínicas (también en lugares muy remotos) y permitir darle acceso a servicios de salud a personas que se encuentran físicamente alejadas, es también un componente importante de beneficio y de desarrollo social que Satmex trae a todo el

continente. De lo anterior podemos observar la importancia de la tecnología satelital y particularmente de la empresa satelital mexicana.

Conforme la tecnología se ha abierto paso a través de los años, los satélites mexicanos han ido evolucionando poco a poco; la evolución de los mismos se ha visto reflejada en cada nuevo satélite que se ha puesto en órbita. Desde el Morelos 1 hasta el Satmex 6, los satélites en México han incrementado y desarrollado su capacidad de transmisión.

Las diferencias y similitudes entre el Satmex 5 y el Satmex 6 que se han planteado en esta tesis han demostrado que efectivamente con el paso de los años el Satmex 6 es un satélite con tecnología y capacidad de comunicaciones más avanzada, Es necesario mencionar (ver capítulo 4) que este par de satélites han sido fabricados por diferentes empresas, sin embargo, fijamos algunos puntos de comparación de todos los subsistemas. Debemos decir también, que para la realización de este trabajo tuvimos algunas carencias de información ya que al ser Satmex 5 un satélite que ha estado en operación durante algunos años, fue de cierta forma sencillo encontrar información técnica de gran valor por el contrario, para Satmex 6 esto no sucedió, ya que aunque contamos con el apoyo de la empresa, la información demasiado técnica aun no está disponible; el principal motivo de esto es que el satélite todavía no se ha puesto en órbita y las medidas de seguridad de la empresa son comprensiblemente estrictas. Finalmente estamos concientes de lo que esto significa y aprovechamos al máximo la información que se nos proporcionó al momento de la investigación para la realización de este trabajo.

Satmex 6 es un satélite aproximadamente 5 años más nuevo. Sus huellas de PIRE son de mayor cobertura dando como resultado que su cobertura llegue a ser continental. La potencia empleada en los transpondedores del Satmex 6 es mayor, lo que ayuda a tener mejor recepción en las estaciones terrenas, ahorro económico y reducción de tamaño de las antenas de las mismas. Los cálculos de enlace nos muestran que :

- Los diámetros de las antenas requeridas en las estaciones terrenas disminuyen en un 55.7%, lo cual origina que tengan menor costo.

El Satmex 6 proporciona una potencia eléctrica mayor a la del Satmex 5, con la cual es capaz de brindar a sus subsistemas mayor energía para poder trabajar de manera mas amplia, tal es el caso del subsistema de comunicaciones. La tecnología en los paneles solares o las celdas solares es más moderna en el Satmex 6, ya que emplea celdas de triple juntura que le brindan mayor eficiencia. De los cálculos de enlace tenemos:

- La relación Portadora –Ruido total  $(C / N)_{total}$  para Satmex 6 es mayor que la correspondiente para Satmex 5 por lo que se concluye que el Satmex 6 proporciona mejor calidad de la señal durante el enlace.
- Respecto al subsistema de comunicaciones se tiene más capacidad en Satmex 6 ya que cuenta con 60 transpondedores en total, mientras que Satmex 5 posee 48.

Satmex 6 cuenta solo con propulsión química, mientras que Satmex 5 cuenta con propulsión química y eléctrica. Esta última tecnología de propulsión aun está en desarrollo y es poco empleada por el fabricante de Satmex 6, brinda como ventajas el ahorro de peso y combustible en el satélite Satmex 5.

El Satmex 6 es un satélite de volumen y peso mas grande por lo que los gastos por ponerlo en orbita se incrementaron, sin embargo es un satélite mas poderoso en el campo de las comunicaciones.

Para el diseño de satélites de la siguiente generación es conveniente incluir Propulsión Eléctrica, ya que representa grandes ventajas, como la disminución del peso del satélite y de la cantidad de combustible necesario para las maniobras del mismo (por lo tanto menor costo), así como el aumento de carga útil (elementos de comunicación) que proporcionarían a dicho satélite mayor capacidad.

En cuanto al costo de los dos sistemas observamos que no existe gran diferencia, pero cabe mencionar que el método que se desarrolló para el cálculo aproximado del costo de construcción de un satélite nos arrojó resultados sorprendentemente cercanos a los reales, esto quiere decir que podemos planear la elaboración de un satélite con un presupuesto previamente calculado y tendremos información bastante confiable.

Quisiéramos finalizar diciendo que un futuro cercano la consolidación de la industria satelital permitirá el desarrollo de nuevos productos que pueden resultar de gran interés para las sociedades. Es muy probable que en los siguientes años se presencie el surgimiento de un nuevo medio de comunicación que derive de la fusión de tecnologías de comunicación que tenemos actualmente, así como la fusión de diversas áreas del conocimiento para crear nuevas tecnologías, tal es el caso de la implementación de MEMS en Satélites de Comunicaciones, lo cual representará muchas ventajas (simplicidad, mejor resistencia al ambiente espacial, menor costo de lanzamiento entre otras) por lo que sería muy importante que en nuestro país comencemos a desarrollar esta tecnología y así poder implantarla en los futuros satélites mexicanos, pues no debemos olvidar que los satélites artificiales de comunicación son el medio más eficiente y rentable para apoyar el crecimiento de la infraestructura de comunicaciones que requieren los países en desarrollo como lo es el nuestro.

## BIBLIOGRAFÍA

### *Libros*

- [1] Comunicaciones por Satélite  
Rodolfo Neri Vela  
Editorial Thomson  
2003
  
- [2] Introduction to Satellite Communication  
Bruce R. Elbert  
Artech House  
1987
  
- [3] Comunicaciones por Satélite  
Principios, tecnologías y sistemas  
Carlos Rosado  
Editorial Limusa / Grupo Noriega  
1999
  
- [4] Space Mission  
Analysis and Design  
James R. Wertz / Wiley J. Larson  
Kluwer Academic Publishers  
1991

### *Artículos de revistas y periódicos*

- [5] David H Layer,  
National Association of Broadcasters  
*“Digital Radio takes to the road”*  
IEEE, Communications, Vol. 38, No. 7,  
Julio de 2001, pp. 40-46
  
- [6] Stephen Cass  
*“MEMS in Space”*  
IEEE, Aerospace, Vol. 38, No. 7,  
Julio de 2001, pp. 56-61
  
- [7] Maricarmen Cortés  
*“Satmex, competencia en el mercado regional”*  
Milenio diario, Sección: Negocios, 29 de julio de 2002 ,  
pp. 45 , México

- [8] José M. Arteaga  
*“El Satmex 6 costará 300 mdd”*  
La Crónica, Sección: Negocios, 9 de agosto de 2002 ,  
pp. 41 , México
- [9] Roberto González Amador  
*“El Satmex 6, el satélite más potente, cubrirá necesidades específicas de México”*  
La Jornada, Sección: Economía, 11 de agosto de 2002,  
pp. 24, México
- [10] José M. Arteaga  
*“El Satmex 6 lleva un 80% de avance y vivirá 18 años”*  
La Crónica, Sección: Negocios, 12 de agosto de 2002 ,  
pp. 36 , México
- [11] José de Jesús Guadarrama  
*“Satmex 6, carta fuerte de Satélites Mexicanos”*  
El Financiero, Sección: Negocios, 12 de agosto de 2002,  
pp. 48, México
- [12] Marielena Vega  
*“A meses el lanzamiento del Satmex VI”*  
El Economista, Sección: Industria y comercio, 12 de agosto de 2002,  
pp. 38, México
- [13] María Osterroth  
*“Satmex por el mercado perdido”*  
Reforma, Sección: Negocios, 12 de agosto de 2002,  
pp. 11, México
- [14] Heidi Rangel Piñón  
*“Satmex 6 : de Canadá hasta la Patagonia”*  
UNOMÁSUNO, Sección: El Dinero 12 de agosto de 2003,  
pp. 16, México
- [15] Heidi Rangel Piñón  
*“Satmex 6 : una partícula abortaría proyecto de 300 mdd”*  
UNOMÁSUNO, Sección: La Economía, 13 de agosto de 2003,  
pp. 32, México

- [16] Patricia Sandoval Vargas  
“*Listo, nuevo satélite, en 2003*”  
Diario de México, Sección: Finanzas, 13 de agosto de 2002,  
pp. 5, México
- [17] Bernardo Pérez Lince  
“*Satmex aumentará 73 % su capacidad*”  
El Asesor de México, El semanario de negocios de la ciudad de México,  
Agosto 19-25 de 2002, México

***Páginas de Internet***

[http://www.satmex.com/archivos/espanol/release\\_finalESPANOL.pdf](http://www.satmex.com/archivos/espanol/release_finalESPANOL.pdf)  
<http://www.loral.com>.  
<http://www.lloyd.com.mx/es/reportes/enero.pdf>  
<http://mensual.prensa.com/mensual/contenido/2003/08/13/hoy/negocios/1188136.html>  
<http://www.wildblue.com/faq/>  
<http://www.loralskynet.com>  
<http://www.teltelematica.freesevers.com/VSAT.htm>  
<http://dc.inictel.gob.pe/Postgrados/CI/Satelital/contenidos.html>  
<http://www.xmradio.com>  
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar05/HTML/articulo04.htm>  
<http://www.depi.itchiuahua.edu.mx/electro/electro2000/mem2000/articulos/CO2.pdf>  
[http://www.telecomm.net.mx/corporativo/historia\\_satelital.htm](http://www.telecomm.net.mx/corporativo/historia_satelital.htm)  
[http://mailweb.udlap.mx/~lgojeda/telecom3/satelites\\_redes/satmex.html](http://mailweb.udlap.mx/~lgojeda/telecom3/satelites_redes/satmex.html)  
[www.angelfire.com/electronic/pfierro/Tech1.htm](http://www.angelfire.com/electronic/pfierro/Tech1.htm)  
<http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/satcomhistory.html>  
<http://collections.ic.gc.ca/satellites/english/function/communic/>  
[http://www.inetdaemon.com/tutorials/satellite/satellite\\_subsystems.html](http://www.inetdaemon.com/tutorials/satellite/satellite_subsystems.html)  
<http://ssdl.stanford.edu/Opal/Subsystems/index.html>  
<http://www.blog.com.mx/archives/000827.php>  
<http://www.uv.mx/universo/111/infgral/infgral04.htm>