

10



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**TECNOLOGÍA Y APLICACIONES DE LOS
ENLACES INTERSATELITALES EN
FRECUENCIAS ÓPTICAS Y EN LA BANDA
Ka.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
P R E S E N T A:
EDITA CELIA HERNÁNDEZ ALVAREZ

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. RODOLFO NERI VELA**



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F., OCTUBRE DE 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIAS

A mis padres, por todo su amor y apoyo siempre, a pesar de mi carácter y mi forma de ser, sé que todo lo que han hecho lo han hecho por amor a sus hijos. Y saben que los amo con todo mi corazón. Gracias por darme la vida y enseñarme a vivirla con honestidad, con responsabilidad, con amor.

A mis hermanos, Natalia y Alfredo porque han sido los mejores hermanos y amigos que alguien puede tener, por ser comprensivos por aguantarme y porque siempre estemos tan unidos como ahora. Los quiero muchísimo.

A Miguel, por todo tu amor, apoyo, paciencia y comprensión en este último año. Por compartir esto conmigo. Te amo y me gustaría descubrir lo que viene después a tu lado.

A Erika, por haber estado conmigo tantos años, por entenderme, por las buenas, por las malas, por las alegrías y las tristezas, por nuestras risas y por nuestros llantos, por todo aquello que hemos pasado juntas, y porque espero que sigamos así toda la vida.

A Nuvia, por darme todo su cariño, por abrirme las puertas de tu casa y ser como una hermana para mí, por todo lo que hemos compartido y por lo que nos falta.

A Hiram y a Horacio, por enseñarme a ver la vida diferente, por su paciencia, por su apoyo, su protección y por todo su cariño, por todos esos desvelos de estudio y también esos de fiesta... no necesito decirles más, porque muchas veces nos hemos entendido sin palabras.

A Adriana y Malco, a Ale y José Manuel, a Silvia y Ricardo, a Elisa, a Citlali y a Toño: a ellos por estar en esa aventura llamada "La Galería Pool House", y a ellas por estar con ellos a lo largo de todo este tiempo, por escuchar y por todo su apoyo.

A mi tía Maya y a mi tío Dany, por su amor, y por estar con nosotros. Los quiero.

A la familia Lozada Can, por siempre estar a nuestro lado.

A Eduardo, por ser una parte de mi vida universitaria, por los cafés, por los poemas, por las ideas geniales y por todo lo demás

A Ulises, mi querido hijo, porque sigan tus éxitos, y por todos tus consejos y por tu apoyo siempre, estés cerca o lejos, y sabes que yo también estaré ahí.

A José Luis, por enseñarme que arriba de las estrellas siempre hay más, gracias por tu confianza, por tu apoyo, por tu risa, por el sushi y por todo.

A Rocio, por siempre escuchar y confiar en mí, por compartir desvelos, pláticas, cigarros y cafés.

A Ricardo y Adriana, por ser siempre tan alegres y por ser los que han mantenido unido al club, aunque lo nieguen, espero sigamos juntos todos.

A Saul y Marcela, a Gustavo y a Alejandra, toda la felicidad siempre.

A Daniel y Alejandro, por siempre saber escuchar, por su paciencia y porque con ustedes conocí lo que es estar en un trabajo.

A Oscar y Alonso, por apoyarme y darme toda su confianza.

A Doña Tere por todo su cariño, su confianza y porque siempre nos ha abierto las puertas de su casa, y a Omar, por ser tan parecido y a la vez totalmente diferente a tu hermano, porque te has unido a ese club tan loco y nos has dado toda tu confianza, tú y toda tu familia tienen un corazón enorme, gracias.

A todos aquellos que de alguna forma han estado presentes durante toda mi vida, o en algún momento de ella, y que siguen, conmigo y con mi familia.

A la generación 95 de Telecomunicaciones.

A todos mis profesores: Victor García, Miguel Moctezuma, a Pablo García y Colomé, y a todos aquellos que han dado su vida por la Universidad, y nos han enseñado y han compartido sus conocimientos.

Al Dr. Nerí, por su paciencia y su apoyo.

A la Facultad de ingeniería y a la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser mi segunda casa, porque sé que es la mejor de todas, a pesar de todo.

Gracias,

Edita

CONTENIDO

CONTENIDO	i
1. Enlaces Intersatelitales	1
1.1. Tipos de Órbitas	1
1.1.1. Órbita Geoestacionaria: GEO	2
1.1.2. Órbita Baja: LEO	3
1.1.3. Órbita Media o Intermedia: MEO	4
1.2. Clasificación de los Enlaces Intersatelitales según el tipo de Órbita	5
1.2.1. Enlace LEO-GEO	5
1.2.2. Enlace GEO-GEO	6
1.2.3. Enlace LEO-LEO	7
1.3. Clasificación de los Enlaces Intersatelitales según la frecuencia que utilizan	8
1.3.1. Enlaces intersatelitales de microondas	8
1.3.2. Enlaces intersatelitales ópticos	9
1.4. Enlaces Ópticos GEO-Superficie Terrestre	10
2. Sistemas que usan enlaces intersatelitales en la banda Ka	11
2.1. Iridio	11
2.1.1. Antecedentes	11
2.1.2. Características y Arquitectura	12
2.1.3. Enlaces Intersatelitales	14
2.1.4. Funcionamiento, Conectividad y Desempeño	17
2.2. Proyecto ARTEMIS/ENVISAT	18
2.2.1. Generalidades ARTEMIS	18
2.2.2. Generalidades ENVISAT	20
2.2.3. Satélite Envisat	21
2.3. Milstar	25

2.4. Parámetros necesarios para calcular un Enlace Interorbital	27
3. Panorama de la Tecnología LASER	32
3.1. Antecedentes	32
3.2. Tipos de Láser	37
3.2.1. Láseres de estado sólido	37
3.2.2. Láseres de gas	38
3.2.3. Láseres de colorante o líquidos	40
3.2.4. Láseres semiconductores	41
3.2.5. Resumen de los láseres más comunes	43
3.3. Las comunicaciones ópticas en el espacio libre	47
3.4. Láseres para enlaces intersatelitales	47
4. Sistemas experimentales con enlaces intersatelitales a frecuencias ópticas	49
4.1. Proyecto ARTEMIS/SPOT 4	49
4.2. SILEX: Carga Óptica del Satélite ARTEMIS	49
4.2.1. Descripción	49
4.2.2. Tecnología	52
4.2.3. Arquitectura de la terminal óptica PASTEL y OPALE	52
4.2.4. Mecanismo de trabajo del SILEX	53
4.2.5. Adquisición y apuntamiento.	54
4.2.6. Centros de operación y control del satélite SPOT-4	56
4.2.7. Resultados y futuro.	56
5. Sistemas comerciales en planeación que emplearán enlaces intersatelitales en la banda ka o en frecuencias ópticas.	58
5.1. Antecedentes	58
5.2. Sistemas de Satélites No Geoestacionarios en Banda Ku.	59
5.3. Sistemas en Banda Ka	61
5.4. Sistemas en banda Q/V	64

6. Conclusiones	66
7. Referencias	68

1. ENLACES INTERSATELITALES

Desde sus inicios, los satélites de comunicaciones han funcionado como simples repetidores en el espacio. Conforme las necesidades de las comunicaciones espaciales han evolucionado, se ha desarrollado el uso de enlaces entre los mismos satélites, con la finalidad de mejorar la capacidad, cobertura y conectividad de los sistemas satelitales actuales.

Generalmente, llamamos un enlace intersatelital, como su nombre lo indica, a cualquier conexión entre dos satélites. De esta forma, podemos hablar de varios tipos de enlaces intersatelitales o ISL (Intersatellite Link, por sus siglas en inglés), dependiendo de la naturaleza del satélite y la órbita del mismo.

1.1. TIPOS DE ÓRBITAS

Existen diversos tipos de órbitas para colocar un satélite, y por ello es importante recordar las características de cada tipo de órbita. La órbita más usada es la órbita geoestacionaria (GEO), pero en años recientes se ha ido saturando, por lo que se han iniciado sistemas de satélites en órbitas más cercanas a la Tierra. Estas órbitas tienen la ventaja considerable de disminuir la atenuación y retardo de las señales del satélite, logrando así una mejor calidad y velocidad de transmisión, así como el uso de una menor potencia y un menor costo del equipo. No obstante, mientras menor sea la altura orbital de un satélite, el tiempo y área de visibilidad del satélite a la Tierra es menor y, por lo tanto, se requiere una mayor cantidad de satélites para mantener un servicio y lograr una cobertura global, lo que ha dado origen a las llamadas Constelaciones de Satélites de Orbitas Bajas e Intermedias[1].

Por otro lado, la baja altitud de estos satélites los expone a fuertes dosis de radiaciones de partículas altamente cargadas de energía del Cinturón Terrestre de Van Allen, ocasionando que estos satélites requieran, a diferencia de los satélites geoestacionarios, mayor protección para los dispositivos electrónicos y para las celdas solares.

Independientemente de las ventajas y desventajas de cada órbita, la mejor posición depende del uso y fines del satélite. A continuación se explicará de forma breve cada una de las órbitas, con sus ventajas, desventajas y aplicaciones.

1.1.1. Órbita Geoestacionaria: GEO

En Octubre de 1945, Arthur C. Clarke, publicó su famoso "Extraterrestrial Data Relays", uno de los primeros documentos que explicaban el uso de estaciones extraterrestres (espaciales) como repetidores de datos para lograr una comunicación entre dos puntos en Tierra distantes [2]. Esto fue el inicio de la teoría de los satélites de comunicaciones, siendo Clarke el precursor de éstos, colocados en una órbita que gire a la misma velocidad de rotación terrestre, de tal forma que el satélite pareciera estar fijo, visto desde un punto en Tierra: la órbita geoestacionaria.

La órbita geoestacionaria es una órbita circular localizada en el plano ecuatorial, con un período orbital igual al período de rotación terrestre, lo cual se logra con una altura de 35786 km sobre la superficie de la Tierra. De esta manera, un satélite localizado en la órbita geoestacionaria parecerá estar fijo arriba de la superficie terrestre.

La huella o el área de servicio de un satélite geoestacionario cubre casi 1/3 de la superficie terrestre (aproximadamente de una latitud de 75°S a 75°N), de tal forma que con un mínimo de tres satélites geoestacionarios se puede lograr una cobertura global.

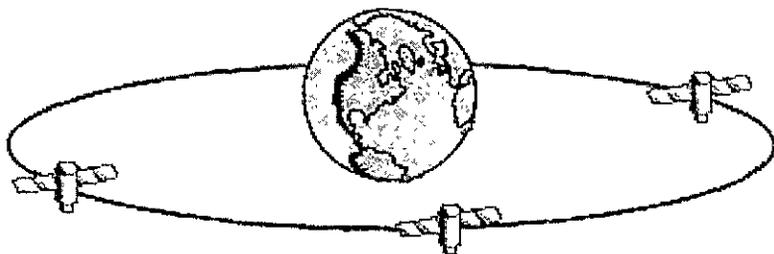


Figura 1.1. Órbita Geoestacionaria.

Una desventaja importante de los satélites geoestacionarios usados en sistemas de comunicaciones de voz es el retardo de subida y bajada, de aproximadamente 250 milisegundos.

1.1.2. Órbita Baja: LEO

Una órbita baja terrestre o LEO (Low Earth Orbit) se encuentra a una altura aproximada de 500 a 2000 km sobre la superficie terrestre y puede ser elíptica o circular, siendo esta última la más usual. Tiene un período orbital variable, entre 90 minutos y 2 horas, dependiendo de la altura a la que se coloque el satélite.

El radio de la huella de un satélite de comunicaciones en una LEO varía de 3000 a 4000 km. El tiempo máximo en el que un satélite en esta órbita está arriba del horizonte local para un observador en Tierra es cerca de 20 minutos. Por lo tanto, un sistema de comunicaciones global que use este tipo de órbita, requiere un gran número de satélites, en varias órbitas con diferentes inclinaciones. Cuando un satélite que da servicio a un usuario en particular se mueve bajo el horizonte local, necesita ser capaz de hacer una transferencia de servicio("hand-over") a otro satélite en la misma órbita o en una adyacente.

La cercanía terrestre de los satélites en órbita LEO les permite operar con una potencia relativamente menor y con antenas en las estaciones terrenas de menor tamaño, comparadas con los sistemas en GEO, lo cual representa una gran ventaja para los servicios móviles actuales, donde se requieren transmisores y receptores ligeros y compactos. La proximidad a la Tierra significa también un menor retraso en la señal, lo cual es requerido para una calidad óptima en las comunicaciones de voz y transferencia de datos a gran velocidad, por ejemplo.



Figura 1.2. Órbita baja.

Los principales sistemas LEO que operan actualmente son Globalstar, el cual consta de 48 satélites en 8 planos orbitales a 1400 km de altura y ofrece servicios de comunicaciones móviles con cobertura global; e Iridio: 66 satélites en 6 planos orbitales a 780 km, del cual se hablará en un capítulo posterior. En la figura 1.3. podemos ver las constelaciones de estos sistemas [3]

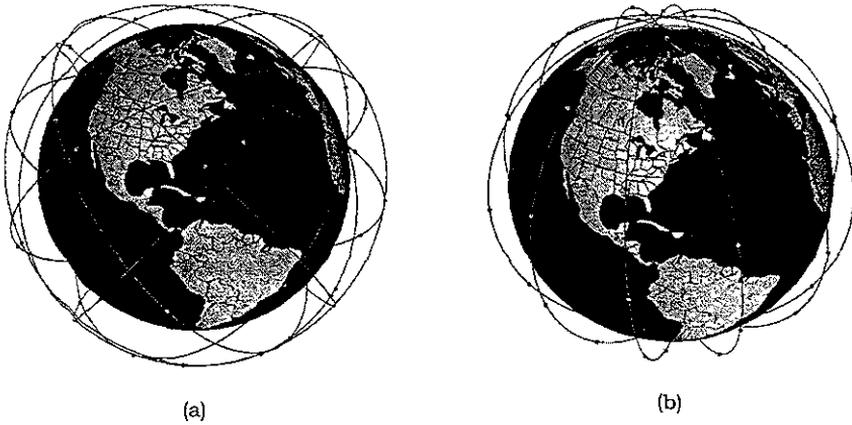


Figura 1.3. Constelaciones de órbita baja: (a) Globalstar (b) Iridio

1.1.3. Órbita Media o Intermedia: MEO

Una órbita media o intermedia es una órbita circular a una altura de alrededor de 10000 km sobre la superficie terrestre. El período orbital dura cerca de 6 horas y el máximo tiempo de visibilidad del satélite es del orden de unas cuantas horas. Un sistema de satélites con cobertura global requiere un menor número de satélites que un sistema LEO, y sólo en 2 ó 3 planos orbitales para lograr una cobertura total. En comparación con los sistemas de órbita baja, la transferencia de servicio ("hand-over") es menos frecuente, porque la huella de cada satélite es más grande y se mueve más lentamente; no obstante, el retardo de propagación y las pérdidas por espacio libre son mayores. El único sistema MEO que actualmente se encuentra en desarrollo y que probablemente empezará a ofrecer servicios tanto a usuarios móviles

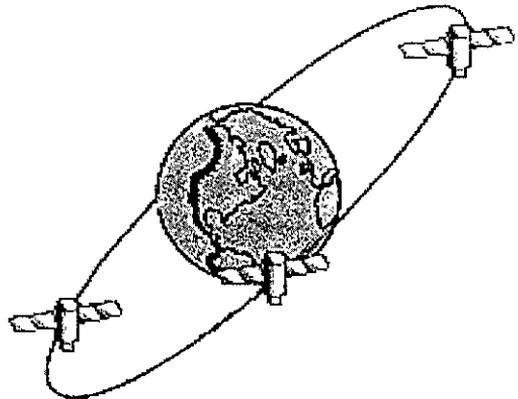


Figura 1.4. Órbita Media.

como fijos alrededor del mundo en el año 2003 es el "Nuevo ICO"¹, que consta de 10 satélites en 2 planos inclinados a una altura de 10355 km.[4]

1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS ENLACES INTERSATELITALES SEGÚN EL TIPO DE ÓRBITA

Regresando a los enlaces intersatelitales, una manera en que podemos clasificarlos es de acuerdo a las órbitas satelitales que enlazan. Por ello, podemos encontrar enlaces LEO-GEO, GEO-GEO, MEO-GEO, enlaces LEO-LEO, etc.

1.2.1. Enlace LEO-GEO

Este tipo de enlace sirve para establecer un "relay" o un repetidor permanente por medio de un satélite geoestacionario entre una o más estaciones terrenas y un grupo de satélites en órbita baja. Este tipo de enlace también se conoce como enlace interorbital o IOL, dado que enlaza satélites en dos diferentes órbitas. Por razones principalmente económicas, instalar una red de estaciones terrenas para controlar un satélite que es visible desde la estación sólo por un tiempo determinado, no es la mejor opción debido a su tamaño y costo. Es por ello que se pueden usar uno o más satélites geoestacionarios, que son visibles de forma permanente y simultánea por la estación y un satélite en órbita baja, como repetidores de comunicaciones.

El primer sistema operativo de este tipo fue implementado por la NASA, y se conoce como Sistema de Satélites de Rastreo y Repetidores de Datos: *TDRSS*². La finalidad de este sistema de satélites geoestacionarios es establecer enlaces de telemetría y comando con satélites LEO, como el telescopio espacial Hubble, así como recibir datos científicos sobre observación terrestre generados por satélites de órbitas bajas, además de dar servicio a los vuelos de transbordadores espaciales y a la nueva estación espacial internacional.

¹ El sistema Nuevo ICO, en inglés "New ICO", es la nueva compañía que surgió de la antigua ICO, y que está controlada por ICO-Teledesic Global, una compañía que a su vez controla las acciones de Teledesic.

² TDRSS: Tracking and Data Relay Satellite System

Asimismo, se encuentra en progreso un programa europeo para la instalación de un Sistema Repetidor de Datos, DRS³, que consistirá de dos satélites repetidores en órbita geostacionaria, de tal forma que puedan ser accedidos desde vehículos en cualquier parte de la órbita baja terrestre hacia cualquier estación terrena localizada sobre una amplia extensión en Europa. El primero de estos satélites es *Artemis*, el cual vemos en la figura 1.5 y del que se hablará en un capítulo posterior.



Figura 1.5. Enlace LEO-GEO: Enlace ARTEMIS-SPOT 4.

1.2.2. Enlace GEO-GEO

En este tipo de enlace, los satélites en órbita geostacionaria pueden tener una distancia de separación de pocos kilómetros, o bien en posiciones con mayor separación. En el primer caso, los satélites deben ocupar la misma posición orbital, para que sean visibles desde una misma antena en tierra. Un grupo de satélites interconectados de esta forma, puede ser una solución ideal para la implementación gradual y modular de segmentos espaciales de grandes dimensiones.

³ DRS Data Relay System

En el segundo caso, los satélites tienen varios grados de separación, y el ISL se usa para incrementar el área geográfica de servicio del sistema de satélites, evitando el aumento del retraso de propagación de la señal y, como una de las principales consecuencias, el aumento de la capacidad del sistema sin necesidad de una inversión fuerte en el segmento terrestre.

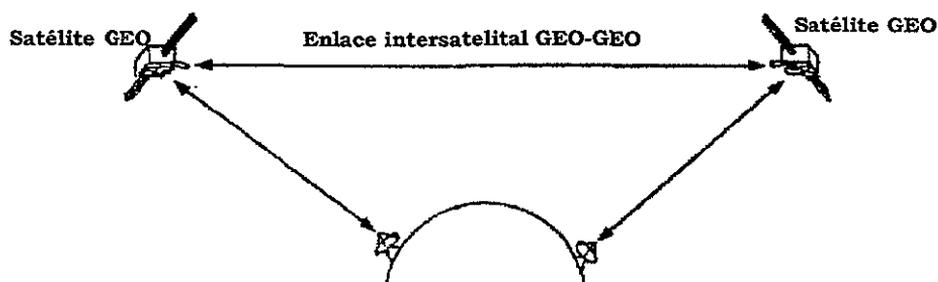


Figura 1.6. Enlace GEO-GEO.

1.2.3. Enlace LEO-LEO

Las ventajas de los satélites de órbitas bajas y la creciente congestión de la órbita geostacionaria han traído como consecuencia el desarrollo de las redes de satélites LEO. Las desventajas de un satélite LEO (duración limitada del tiempo de comunicación y cobertura relativamente pequeña), se reducen usando una red que contiene un gran número de satélites de órbita baja conectados entre sí con enlaces intersatelitales y equipados con un medio de conmutación entre ellos.

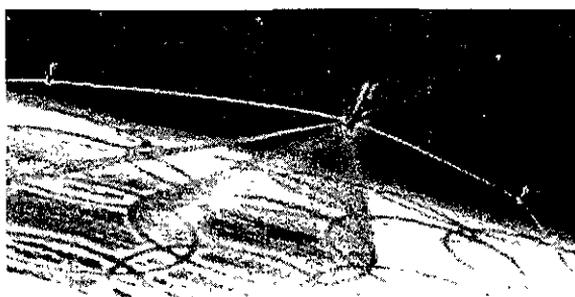


Figura 1.7. Enlace LEO-LEO: Iridio.

Un ejemplo de este tipo de red, es la red de Iridio, colocada en órbita por Motorola, para dar servicios personales celulares de comunicación con cobertura mundial.

1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS ENLACES INTERSATELITALES SEGÚN LA FRECUENCIA QUE UTILIZAN

Los enlaces intersatelitales también se pueden clasificar de acuerdo con la frecuencia que utilizan para la comunicación, como sigue:

1.3.1. Enlaces intersatelitales de microondas

Los ISL de microondas utilizan las bandas de frecuencias especificadas en la tabla 1.1, que han sido asignadas por la UIT⁴. A estas frecuencias ocurren fuertes absorciones en la atmósfera terrestre, pero fueron escogidas para evitar las interferencias de los enlaces intersatelitales con los sistemas terrestres (por radiación de los lóbulos laterales de las antenas), además de que el problema de la absorción atmosférica no existe en el vacío del espacio.

Tabla 1.1. Frecuencias asignadas por la UIT para enlaces intersatelitales [5].

Frecuencia (GHz)	Banda (aproximada) o clasificación
22.25-27.5	K
32-33	Ka
54.25-58.2	U
65-71	U
116-134	EHF
170-182	EHF
185-190	EHF

El uso de las frecuencias arriba de 100 GHz actualmente no es práctico, debido a la falta de componentes confiables de radiofrecuencia, a la alta precisión requerida para

⁴ UIT. Unión Internacional de Telecomunicaciones

as antenas reflectoras y a los requerimientos tan exigentes para los sistemas de rastreo.

La banda de los 50 a 60 GHz (banda U) parece ser la más adecuada actualmente, dado que la absorción del oxígeno terrestre da una buena protección al enlace intersatelital contra las posibles interferencias terrestres y los componentes necesarios de RF ya han sido desarrollados. Sin embargo, como se verá en la sección 2.1, el sistema Iridio emplea frecuencias más bajas (banda Ka).

1.3.2. Enlaces intersatelitales ópticos

Por lo que se refiere a los enlaces intersatelitales ópticos, estos tienen mayores ventajas que los de microondas, debido principalmente a las siguientes razones:

- Tienen un gran ancho de banda, con la única limitación que da el avance de la tecnología en la fabricación de dispositivos de alta confiabilidad.
- Prácticamente no hay restricciones por tratados internacionales.
- Utilizan antenas muy pequeñas (telescopios).

De la misma forma, los efectos de dispersión, que demeritan las comunicaciones ópticas en la atmósfera terrestre, son nulos en las comunicaciones intersatelitales, nuevamente por el vacío del espacio.

La selección de las longitudes de onda ópticas está determinada por el estado actual de la tecnología óptica. Se consideran básicamente cuatro alternativas [6]:

- a. El láser de CO₂, capaz de producir cerca de 1W de potencia modulada a una longitud de onda de 10.6 μm .
- b. Diodo láser de GaAlAs, que produce cerca de 50 mW de potencia en la ventana de 800 a 900 nm.
- c. Diodo láser de GaAsP, que trabaja a 1300 nm con cerca de 100 mW.
- d. Láser de Nd-YAG, en la longitud de onda de 1060 nm con alta pureza espectral y con una potencia alrededor de 1W.

Sobre la tecnología y los tipos de láser, se hablará en el capítulo 3.

1.4. ENLACES ÓPTICOS GEO-SUPERFICIE TERRESTRE

Los enlaces usados para comunicar un satélite con la Tierra comúnmente son de RF. Sin embargo, debido a las ventajas de los sistemas de comunicaciones ópticos, también se han investigado los enlaces ópticos entre una plataforma en el espacio y la superficie terrestre.

A pesar de sus grandes ventajas con respecto a los sistemas de radiofrecuencia, como son mayor ancho de banda y menor consumo de potencia, para esta aplicación, los enlaces ópticos enfrentan una importante desventaja debido a los efectos de la atmósfera y el clima, ya que los pulsos del láser son afectados frecuentemente por la interferencia en las capas atmosféricas, conocida como el efecto de centelleo.

Uno de los proyectos que se están llevando a cabo para probar este tipo de enlaces es el de la Oficina Nacional de Reconocimiento (NRO⁵), llamado GeoLITE (Geosynchronous Lightweight Technology Experiment).

GeoLITE es un satélite experimental con la tecnología más avanzada, diseñado para probar la efectividad de las comunicaciones láser. Su objetivo principal será conocer cómo interfieren las condiciones atmosféricas con los pulsos láser, además de que lleva una carga útil de comunicaciones en UHF. El satélite pesará alrededor de 1800 kg y será lanzado en un cohete Delta II, de Boeing, en el año 2001. Será construido por la compañía TRW, que tiene toda la responsabilidad de la integración del sistema. En el proyecto también colaboran el Laboratorio Lincoln del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), responsable de la carga de comunicaciones ópticas, y la compañía Hughes Space and Communications, que realizará la parte de comunicaciones en UHF.

⁵ NRO: National Reconnaissance Office

2. SISTEMAS QUE USAN ENLACES INTERSATELITALES EN LA BANDA KA

Actualmente, uno de los pocos sistemas de satélites de comunicaciones comerciales y en operación que hace uso de enlaces intersatelitales en frecuencias dentro de la banda Ka es el sistema Iridio, una constelación satelital en órbita baja que ofrece servicios de comunicaciones móviles.

En los últimos años, se han desarrollado proyectos de comunicación intersatelital e interorbital a diferentes frecuencias de microondas, los cuales son en su mayoría sistemas de prueba o no comerciales, como los satélites militares estadounidenses Milstar, de los cuales se hablará más adelante; o como proyectos de la Agencia Espacial Europea (ESA), que desarrollan comunicaciones entre satélites, como es el caso del proyecto *Envisat*, el cual tendrá un enlace entre un satélite de percepción remota y un satélite geostacionario, el *Artemis*.

En este capítulo se hablará de este tipo de proyectos, destacando sus características referentes a sus enlaces intersatelitales.

2.1. IRIDIO

2.1.1. Antecedentes

El sistema Iridio, en inglés Iridium, es una red de comunicaciones personales inalámbricas que usa satélites en órbita baja, diseñada para permitir cualquier tipo de transmisión telefónica, como voz, radiolocalización, fax o datos, a cualquier punto de la superficie terrestre. Este sistema incorpora enlaces intersatelitales, una arquitectura telefónica basada en GSM⁶ y un proceso de acceso al sistema controlado geográficamente.

⁶ GSM: Global System for Mobile communications.

El proyecto surgió a fines de la década de 1980's, a iniciativa de Motorola, con el objetivo de ofrecer comunicaciones inalámbricas móviles entre dos puntos cualesquiera de la superficie terrestre en cualquier momento [7]. En el año de 1991 se creó Iridium LLC, compañía que se encargaría del desarrollo y lanzamiento de la red, mientras que Motorola quedaba como primer contratista para la construcción de los satélites. La red fue puesta en servicio en el año de 1999, y poco tiempo después se tuvo que declarar en bancarrota por problemas financieros y fue puesta fuera de servicio en Marzo del año 2000. Finalmente, una compañía llamada Iridium Satellite LLC, compro los bienes de Iridium LLC, y comenzó a dar servicio con los satélites a mediados del año 2001, ofreciendo voz y datos [8].

2.1.2. Características y Arquitectura

Las conexiones entre la red Iridio y la red telefónica pública conmutada son a través de los telepuertos. Cada satélite está conectado a sus cuatro satélites vecinos a través de un enlace intersatelital, que le proporcionan flexibilidad donde no puede ser localizado por alguno d los telepuertos. Una llamada originada en una terminal móvil puede ser ruteada por la red de satélites y conectada a cualquier otra terminal móvil localizada en cualquier parte del mundo, o puede ser conectada a la red pública a través de cualquier telepuerto.

En la tabla 2.1, se resumen las características del sistema Iridio. [9]

Tabla 2.1. Resumen de características del sistema Iridio.

Segmento Espacial	
Número de Satelites	66 activos, 6 de reemplazo en órbita
Número de planos orbitales	6
Altura de la órbita	780 km
Inclinación de los planos orbitales	86.4°
Periodo	100.1 minutos
Tiempo de visibilidad del satélite	11.1 minutos
Cobertura	5 9 millones de millas cuadradas por satélite.
Peso del satélite	689 kg
Haces por satélite	48
Número total de haces	3168 (no usados todos, debido al traslape en zona polar)

Diámetro del haz	600 km (mínimo)
Diámetro de la huella en tierra	4700 km
Margen del enlace	16 dB (promedio)
Potencia de salida del satélite	1400 W
Vida útil	5 a 8 años
Antena del satélite	Fija, celdas móviles

Segmento Terrestre

Número de estaciones terrenas o telepuertos	11
---	----

Bandas de Frecuencia

Enlaces en banda L	1616-1626.5 MHz	Banda L
Enlaces Intersatelitales	23.18-23.38 GHz	Banda Ka
Enlaces Telepuerto-TT&C		
Enlaces de Bajada	19.4-19.6 GHz	Banda Ka
Enlaces de Subida	29.1-29.3 GHz	Banda Ka

Equipo de conmutación

Siemens GSM-D900	
------------------	--

Señalización

Gateway a ISC	Transmisión PCM y SS7-ISUP o MFCR2
Teléfono Iridio	FDMA/TDMA, QPSK

Tasas de transmisión

Voz	Full-duplex, 2.4 kbps
Datos/fax	2400 bauds

Lanzamiento

Boeing Space Systems, Delta II	5 satélites Iridio por lanzamiento
Khrunichev Proton	7 satélites Iridio por lanzamiento
China Great Wall Long, March 2C/SD	2 satélites Iridio por lanzamiento

Cada uno de los satélites que conforman la red de Iridio, mide aproximadamente 4 metros y pesa alrededor de 700 kg. Tiene un módulo de misión principal, el cual contiene un arreglo en fase de tres antenas que dan servicio a los suscriptores en la superficie terrestre. Estas son antenas que trabajan en banda L, producen una huella circular de diámetro aproximado de 4450 km, formada por 48 haces.

En la siguiente figura se muestra un satélite Iridio con sus módulos.

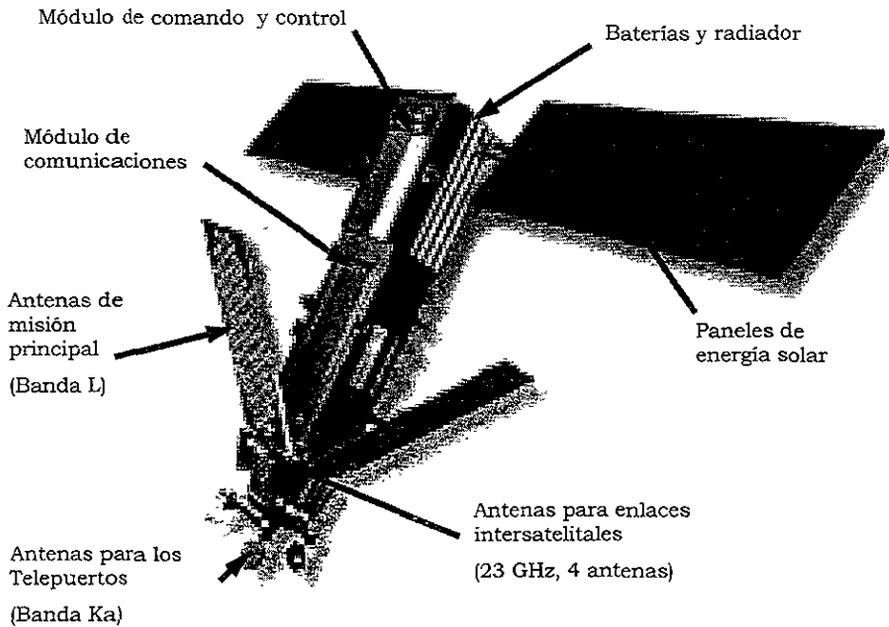


Figura 2.1. Satélite Iridio

2.1.3. Enlaces Intersatelitales

Los enlaces intersatelitales de Iridio se distinguen entre ISL Intra-orbitales o Intraplanares e ISL Inter-orbitales o interplanares. Para cada satélite debe haber 2 o 4 ISL, 2 intraplanares todo el tiempo y 2 enlaces interplanares adicionales, si es posible, lo cual depende de la órbita en la que se encuentre el satélite y su posición, ya que si se encuentra cerca de los polos, debido a la rapidez con la que se mueve, no es posible mantener enlaces interplanares. [10]

Los enlaces intersatelitales intra-orbitales conectan satélites en la misma órbita. Un satélite tiene comunicación con el satélite que tiene al frente, y con el que tiene detrás. Dado que el movimiento relativo de satélites en órbita circular de un mismo plano orbital es nulo, el ángulo de apuntamiento de las antenas para este enlace es siempre constante.

Los enlaces intersatelitales inter-orbitales conectan satélites en planos orbitales adyacentes. Debido al movimiento relativo entre estos satélites, dos satélites en planos orbitales adyacentes se ven uno al otro

En la figura 2.2. se muestra los ISL, donde una intersección representa la posición de un satélite activo.

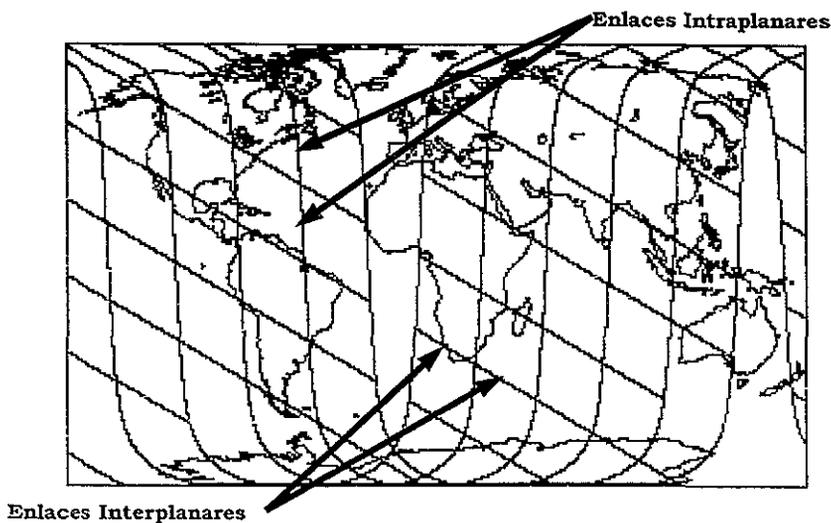


Figura 2.2. Enlaces Intersatelitales de Iridio.

Las antenas para los enlaces cruzados o intersatelitales se encuentran en la base del módulo de comunicaciones. Son cuatro arreglos de antenas ranuradas, separadas 90° una de la otra para alinear las señales con sus respectivas antenas vecinas, proporcionan básicamente capacidad omnidireccional. Son antenas direccionables mecánicamente y de open-loop.

El proveedor de las antenas para los enlaces intersatelitales de Iridio es la compañía canadiense COM DEV International Ltd, la cual ganó el contrato para la construcción de 4 antenas para enlaces cruzados, así como las cuatro antenas para los gateway y dos antenas para telemetría y control, para todos los satélites de la constelación. [11]

Los ISLs operan en un rango de frecuencia de 22.55 a 23.55 GHz, a 25 Mbps. El ángulo de apuntamiento horizontal entre dos satélites en planos orbitales adyacentes, referenciados a cero grados paralelos al ecuador, varía entre $\pm 65^\circ$ sobre un periodo orbital. Este ángulo varía lentamente sobre el ecuador, donde los satélites en órbitas adyacentes están más separados, y varía más rápido sobre los polos, donde las órbitas se cruzan. Esta variación hace necesarias antenas direccionables para mantener los enlaces interorbitales. El rango direccionable de las antenas es en un rango de entre 30 y 45° , suficiente para mantener dichos enlaces en un azimuth horizontal nominal de $\pm 45^\circ$ a 50° entre las latitudes de 50 a 60° norte y sur.

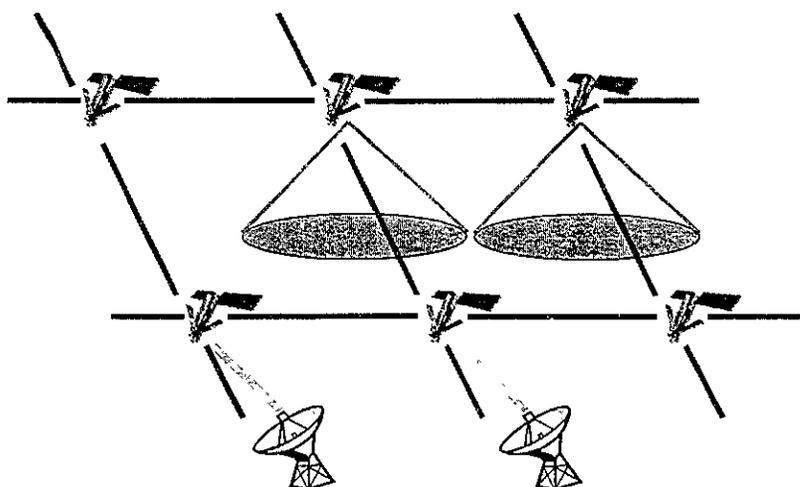


Figura 2.3. Esquema general del sistema Iridio: Satélites, Enlaces Intersatelitales, Cobertura, Telepuertos.

Los enlaces intersatelites le dan a la red gran autonomía comparada con redes de satélites GEO, ya que se necesitan pocos gateways debido a que el ruteo de las llamadas se hace a través de estos enlaces. La complejidad de los satélites de Iridio se debe a las capacidades de procesamiento a bordo requeridas para manejar los ISLs y la conectividad de la red. Una asignación eficiente de enlaces y algoritmos de ruteo puede optimizar el retraso de la red y decrementar los encabezados en los mensajes. Estos algoritmos convergen a una solución con pocos datos de encabezados, que impacta directamente el desempeño de la red.

2.1.4. Funcionamiento, Conectividad y Desempeño

Cuando se activa un teléfono Iridio, el satélite más cercano, en unión con la red Iridio, valida automáticamente al usuario y determina su localización. El suscriptor selecciona ya sea transmisión satelital o celular, dependiendo de la compatibilidad del sistema, para realizar una llamada.

Si el sistema celular del usuario no está disponible, el teléfono se comunica directamente con un satélite. La llamada entonces es transferida de satélite a satélite a través de una red a su destino, ya sea a otro teléfono Iridio o a una estación terrena de Iridio. Los telepuertos del sistema Iridio interconectan la red satelital con infraestructuras en tierra fijas o inalámbricas alrededor de todo el mundo.

La constelación de Iridio está basada en una constelación circular polar donde los planos orbitales tienen sus puntos de intersección cerca de los polos y la mayor distancia entre ellos ocurre en el ecuador.

Los algoritmos de conectividad del sistema Iridio no son objeto de este trabajo, pero se debe tomar en cuenta para el desempeño del sistema.

La red de Iridio tiene esencialmente dos planos de nodos: las estaciones en tierra y los satélites, ambos planos moviéndose uno respecto al otro. Por ellos, los enlaces que conectan las estaciones terrenas con los satélites cambian a través del tiempo. Un enlace se establece desde la estación en tierra al satélite que tenga la señal más fuerte. Un usuario móvil puede considerarse estacionario respecto a la velocidad de los satélites, ya que estos se mueven mucho más rápido. A medida que los satélites se mueven, el enlace desde la estación terrena hace un "hand off" del satélite que deja el área donde se encuentra el usuario, al satélite que está entrando a la mencionada área. La conectividad entre el plano en tierra y el satelital es cíclico por naturaleza. Esto se puede definir como el tiempo que toma a los dos planos alinearse en la misma posición y establecer los mismos enlaces entre ellos. Asumiendo que cada satélite tiene un periodo orbital de 100.13 minutos, el plano satelital vuelve a la misma posición cada 100.13 minutos, mientras que el plano terrestre se encuentra en la misma posición cada 1440 minutos. El tamaño de las huellas de los satélites y de los ángulos de elevación mínimos de las estaciones terrenas deben tomarse en cuenta para determinar la conectividad entre éstos. A pesar de que la localización relativa de

un satélite y la estación terrena no son precisamente los mismos, los mismos enlaces pueden ser establecidos. [12]

2.2. PROYECTO ARTEMIS/ENVISAT

2.2.1. Generalidades ARTEMIS

ARTEMIS⁷ es un satélite geoestacionario de telecomunicaciones multipropósito de la Agencia Espacial Europea, precursor del programa DRS⁸ europeo, sistema de Repetición de Datos, como ya se mencionó en el primer capítulo, donde varias compañías de este continente están involucradas.

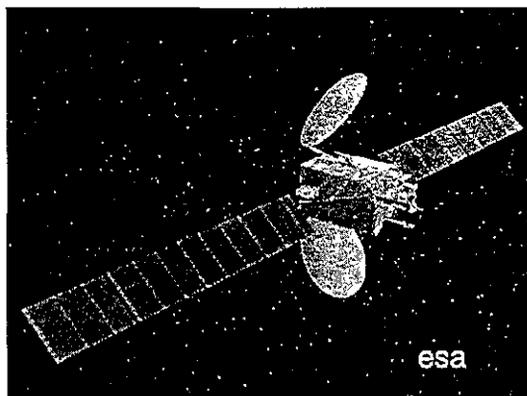


Figura 2.4. Satélite Geoestacionario ARTEMIS

Los tres objetivos generales del proyecto ARTEMIS son: ofrecer servicios satelitales móviles, de forma confiable y de amplia cobertura a lo largo de toda Europa; proporcionar comunicaciones directas entre satélites mediante un innovador enlace óptico, y por último contribuir con el Sistema de Navegación Global Europeo (EGNOS)⁹.

⁷ ARTEMIS: Advanced Relay and Technology Mission Satellite.

⁸ DRS: Data Relay System.

⁹ EGNOS: European Global Navigation System

El contratista principal del satélite ARTEMIS es Alenia Aerospazio, que empezó a fabricarlo a finales de 1991. El lanzamiento fue programado para el julio del año 2001, por el lanzador Ariane 5, de la Agencia Espacial Europea. Fue lanzado de acuerdo a lo programado y fue dejado en una órbita más baja a la esperada, por lo que tomará un par de meses colocarlo en órbita geoestacionaria [13], y se espera que a principios del año 2002 pueda estar totalmente funcional.

En lo referente a los enlaces intersatelitales, ARTEMIS pretende establecer una comunicación constante o durante periodos largos con uno o varios satélites en órbita baja, a través del equipo óptico repetidor de datos, ODR¹⁰, o por medio del equipo repetidor de datos en banda Ka, llamado SKDR¹¹

En la siguiente figura podemos observar los subsistemas principales del satélite.

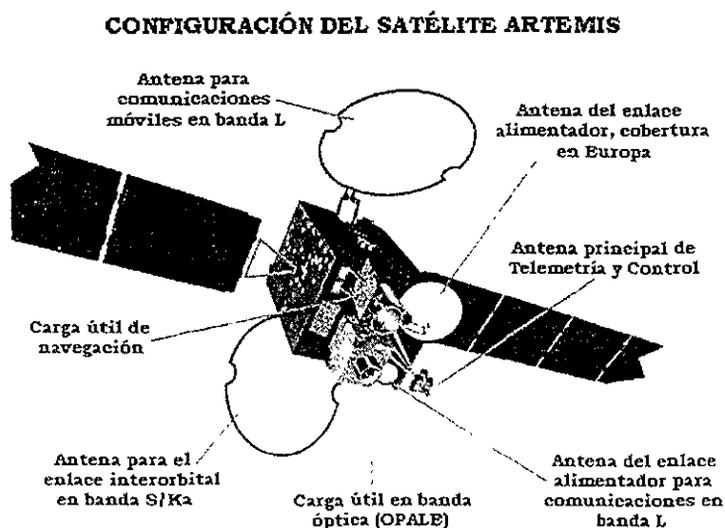


Figura 2.5. Componentes del satélite ARTEMIS.

¹⁰ ODR. Optical Data Relay

¹¹ SKDR: S-Ka Band Data Relay El satélite Artemis, solo repetirá en banda Ka, ya que los enlaces en banda S fueron cancelados

2.2.2. Generalidades ENVISAT

Es una misión multidisciplinaria de la Agencia Espacial Europea, cuyos objetivos son monitorear y estudiar nuestro ambiente de una forma global desde el espacio, a través de un satélite de percepción remota con órbita polar, el cual ofrecerá una completa cobertura terrestre, una continuidad de las mediciones a lo largo de las estaciones y del año, así como mediciones estables y altamente repetibles. Este proyecto continuará los programas de observación terrestre que comenzaron con los satélites ERS, de una forma mejorada y con mayor capacidad. [14]

Considerando los puntos anteriores, la arquitectura de la misión se puede visualizar en la siguiente figura:

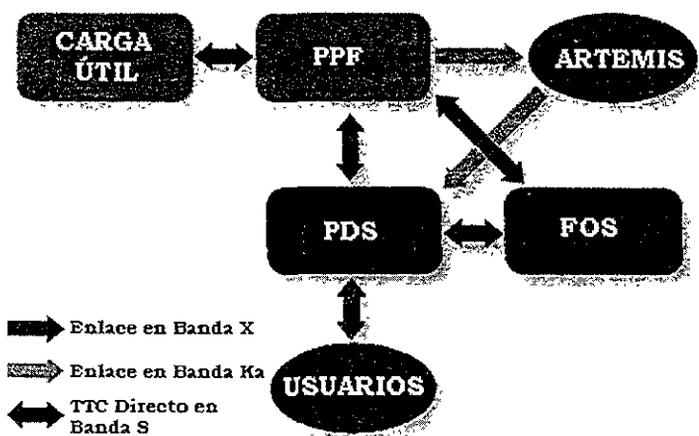


Figura 2.6. Arquitectura de la Misión Envisat

La misión consta de dos partes principales de implementación. La primera es el desarrollo de un conjunto de instrumentos que satisfagan la necesidad de observar la tierra en su conjunto y su atmósfera desde el espacio, que pueda por ejemplo ver cuestiones como calentamiento global, el cambio climático, etc. La otra parte es el desarrollo de un segmento en tierra que incluya un segmento de operaciones de vuelo

dedicado al control y operación tanto del satélite como de la misión, que asegure la planeación de la carga operativa, la adquisición y procesamiento de los datos, la distribución y almacenamiento de los mismos, y los servicios a usuarios, tomando en cuenta la infraestructura en tierra existente de la Agencia Espacial Europea y de los estados participantes.

El sistema de la misión ENVISAT-1 está compuesto de dos partes funcionales principales: el satélite y el segmento terrestre. Además, se usará el satélite ARTEMIS como instrumento para la recuperación de datos, usado en forma complementaria a los enlaces de banda X directos a tierra que tiene el satélite.

2.2.3. Satélite Envisat

El satélite ENVISAT-1 está constituido básicamente por 3 módulos: una Plataforma Polar (PPF), un módulo de servicio (SM: Service Module) y un módulo de carga útil (PLM, Payload Module) [15].

La plataforma polar PPF es la carga relacionada con la observación terrestre, la cual agrupa un conjunto de siete instrumentos desarrollados por la Agencia Espacial Europea (EDI's¹²) y tres instrumentos desarrollado por licitación (AOI's¹³). En la tabla 2.2. se resume de manera general el tipo de instrumento y las disciplinas a las que está enfocado, y en la figura 2.7. se ilustra el satélite Envisat, señalando los subsistemas e instrumentos.

Asimismo, en el módulo de servicio (SM o Service Module) se encuentran la mayor parte de los subsistemas de soporte del satélite, como los de generación de energía, almacenamiento y distribución, el sistema de control de altitud y orbital (AOCS), el subsistema de comunicaciones en banda S, la estructura de soporte y la interfaz de lanzamiento.

El módulo de carga útil, o PLM, lleva los instrumentos y la carga dedicada, con los subsistemas de control de instrumentos y manejo de datos, comunicaciones en banda X y Ka, distribución de energía y la estructura en sí.

¹² EDI's: ESA Developed Instruments.

¹³ AOI's. Announcement of Opportunity Instruments

Tabla 2.2. Módulos de PPF y sus disciplinas.

			Atmósfera	Tierra	Océanos	Hielos
EDI's	MERIS	Espectrómetro de Imágenes de Resolución Media (Medium Resolution Imaging Spectrometer)	✓	✓	✓	✓
	MIPAS	Resonador Pasivo Interferométrico de Michelson (Atmosférico Michelson Interferometric Passive Atmospheric Sounder)	✓			
	ASAR	Radar de Apertura Sintética Avanzado (Advanced Synthetic Aperture Radar)		✓	✓	✓
	GOMOS	Monitoreo Global del Ozono por Ocultación de Estrellas (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars)	✓			
	RA2	Radar Altimetro 2 (Radar Altimeter 2)		✓	✓	✓
	MWR	Radiómetro de microondas (Microwave Radiometer)	✓			
	LRR	Retroreflector Láser (Laser Retro Reflector)		✓	✓	✓
AOI's	SCIAMACHY	Espectrómetro de Absorción de Escaneo de Imágenes para Cartografía Atmosférica (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography)	✓			
	AATSR	Radiómetro Avanzado de Escaneo de trayectoria (Advanced Along Track Scanning Radiometer)	✓	✓	✓	✓
	DORIS	Radioposicionamiento y Orbitografía Dopplet integrada por satélite (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)		✓		

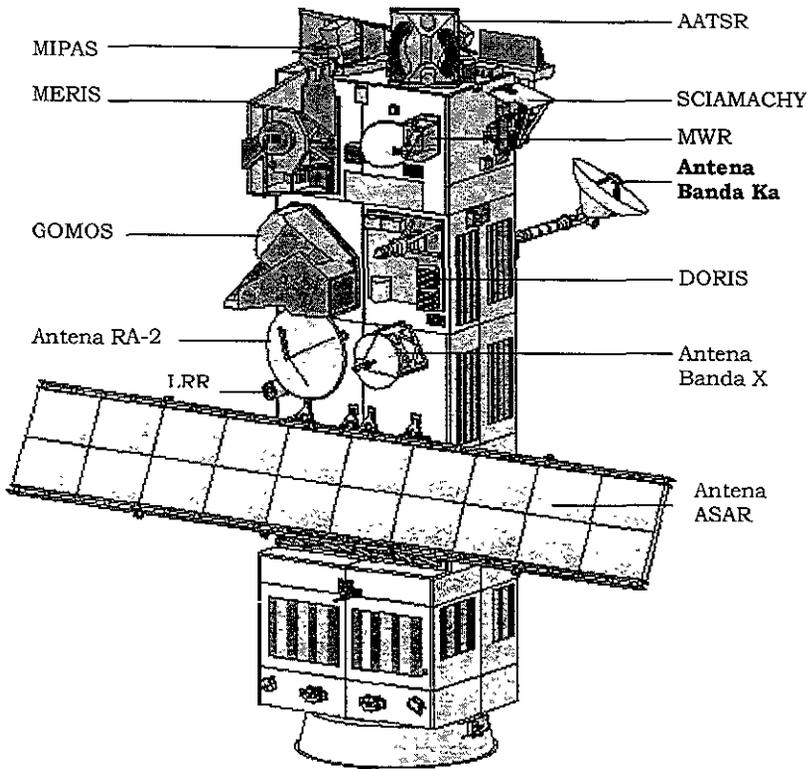


Figura 2.7. Estructura y Componentes del Satélite Envisat

El subsistema de transmisión en banda Ka tiene tres enlaces de 100 Mbit/s para la transmisión de datos a tierra a través del satélite ARTEMIS. Su equipo de modulación y amplificación es similar al usado en el subsistema en banda X, pero requiere en el panel de zenith un montaje exterior que consiste en un mástil desplegable que lleva el mecanismo de apuntamiento de la antena (APM), el cual controla el apuntamiento de la antena al satélite de relevo de datos de acuerdo a una trayectoria definida.

El satélite Envisat será lanzado en el mes de noviembre de 2001 desde el centro espacial en Korou, en la Guyana Francesa por el Ariane 5.

Segmento Terrestre.

El segmento terrestre proporcionará los medios y recursos para administrar y controlar la misión, de recibir y procesar los datos producidos por los instrumentos y de disseminar y archivar los productos generados. Además, proveerá una interfaz simple para permitir que los usuarios utilicen el sistema en línea y de una forma óptima, para satisfacer sus necesidades.

El segmento terrestre puede dividirse en dos elementos principales:

El segmento de Operación de Vuelo (Flight Operation Segment, FOS), el cual está compuesto por el Centro de Control de Operaciones de Vuelo (FOCC), localizado en Alemania, en Darmstadt, ESOC, y por los comandos asociados y estaciones de control. Se encarga del control del satélite a través de todas las fases de la misión. Además, proporcionará todo lo relacionado con la configuración del satélite y el monitoreo del desempeño, el mantenimiento del software del PPF y de los elementos de predicción orbitales.

El segmento de la Carga de Datos (Payload Data Segment, PDS), que comprende todos aquellos elementos relacionados con la adquisición de datos, procesamiento, almacenamiento, así como aquellos relacionados con la interfaz y servicios de usuario. Los centros y estaciones del segmento PDS estarán coordinados por un PDCC o Centro de Control de Payload Data, localizado en la ESRIN, en Frascati, Italia. Éste centro proveerá la interfaz con el FOCC para todas las actividades de planeación de la misión.

Las estaciones de PDS de ESA incluyen una estación PDHS-K y una PDHS-E, la primera localizada en Kiruna salmijarvi, la cual manejará la recepción de datos en banda X, y la segunda, localizada en la ESRIN, que recibirá a través de una terminal de usuario terrestre (JET) todos los datos retransmitidos vía ARTEMIS en banda Ka. También tendrá una estación de adquisición de datos, (PDAS), recibiendo datos en banda X y localizado en Fucino, Italia.

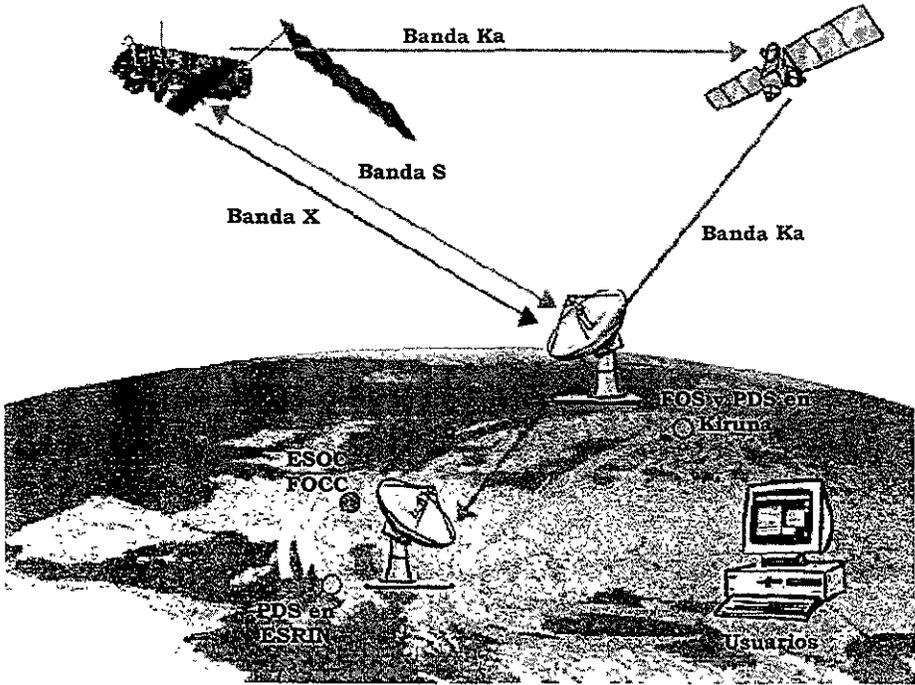


Figura 2.8. Arquitectura del Sistema Envisat

2.3. MILSTAR

La primera comunicación intersatelital se realizó en diciembre de 1995 [16] entre dos satélites militares, Milstar, transmitiendo un mensaje entre ellos sin que éste pasase por una estación terrena. El primer satélite fue lanzado en febrero de 1994 y el segundo a finales de 1995. Se comunican por lo que se llama "enlaces cruzados" o "crosslinks"

El mensaje transmitido fue:

"A new era of military C2¹⁴ capability has recently been inaugurated using satellite-to-satellite information to communicate without ground relays. The first technological

¹⁴ El término C2 es una referencia militar a "Comando y Comunicaciones"

handshake in space using Milstar crosslinks reflects both the cooperative spirit of joint operations and the magnificent information age war fighting advantages available at America's vital interest around the globe are protected.”

Milstar fue desarrollado para proveer comunicaciones seguras, sin problemas de tráfico y con conectividad global a los usuarios que estuvieran autorizados por la milicia estadounidense.

La carga del enlace cruzado proporciona comunicaciones seguras usando frecuencias específicas y antenas con alta ganancia y haces delgados.

Milstar tiene cuatro satélites en órbita geosíncrona con capacidad de utilizar enlaces cruzados en la banda U, a 60 GHz, y proveerá interconexiones con sólo una estación terrena en un solo lugar.

El segmento espacial de los satélites Milstar consiste en una constelación de satélites que proporcionan cobertura global. Los dos primeros satélites Milstar ofrecen comunicaciones LDR¹⁵, a una velocidad baja de transmisión de datos. Esta carga útil proporciona comunicaciones de supervivencia y es interoperable entre todas las ramas de las fuerzas armadas. En el tercer y cuarto satélite Milstar se añadió una carga de velocidad media, MDR¹⁶, para ofrecer a los usuarios tácticos mayor capacidad de comunicaciones.

La carga útil para los enlaces cruzados de los satélites Milstar fue desarrollada por Hughes. Estos enlaces proporcionan comunicación de datos en banda U (60 GHz, aproximadamente) entre los satélites Milstar, tanto para la carga LDR como la MDR. Esto incluye la modulación, demodulación, conversión de subida, amplificación para transmisión y conversión de bajada.

La carga de los enlaces cruzados de los satélites consiste de dos elementos principales: un par de montajes de onda milimétrica, los cuales incluye el grupo de antenas con un modulador de autorrastreo, un transmisor y receptor, así como la unidad de telemetría y comando; y un montaje llamado I-Panel, que incluye los receptores, la unidad de adquisición y la de autorrastreo. [17]

¹⁵ LDR: Low Data Rate

¹⁶ MDR Medium Data Rate

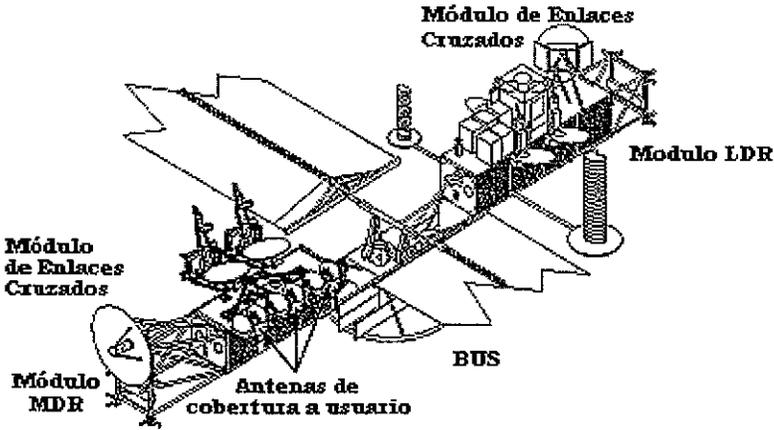


Figura 2.9. Esquema del Satélite Milstar 2

2.4. PARÁMETROS NECESARIOS PARA CALCULAR UN ENLACE INTERORBITAL.

Tanto para comunicaciones de radiofrecuencia, como ópticas, los parámetros del sistema y márgenes de desempeño se calculan usando la ecuación del enlace, la cual calcula la energía detectada en el receptor basándose en la potencia modulada inicial, ganancias y pérdidas del sistema, así como la influencia de los efectos de propagación a través de un medio de transmisión.

Así, cualquier sistema de comunicación, debe ser diseñado para cumplir ciertos estándares de desempeño mínimo, tomando en cuenta las limitaciones de potencia y ancho de banda.

Para transmisiones analógicas, la medida básica del desempeño del sistema es la relación señal a ruido (SNR) en el canal de información en la salida del enlace.

Para transmisiones digitales, el criterio más importante es el BER (Bit Error Rate), que es la relación entre el número de bits recibidos con error y el número de bits transmitidos totales. Para sistemas satelitales, los valores de BER requeridos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.3. Valores de BER requeridos para sistemas satelitales.

Tipo de información	BER
Datos	No mayor a 10^{-6}
Voz (Conversación telefónica con codificación digital)	No mayor a 10^{-4}

En un enlace satelital, el BER depende de varios factores, como son:

La relación portadora a ruido, (C/N: Carrier-to-noise) de la señal de radiofrecuencia en la entrada del receptor respecto al total de ruido en la entrada del receptor.

El tipo de modulación y el esquema de corrección de errores usado para la transmisión.

Los tipos de modulación más usados en las comunicaciones satelitales son las del tipo M-PSK, donde $M=2^b$, siendo $b=1,2$ ó 3 . En este tipo de modulación, la información de entrada binaria se divide en bloques de b bits. Cada uno de estos bloques se transmiten como uno de M símbolos posibles, cada símbolo siendo una senoidal de frecuencia portadora, con uno de M valores posibles de fase.

Respecto a las pérdidas por ruido, debemos tomar en cuenta que la mayor fuente de ruido en el espacio libre es el sol, lo cual debemos tomar en cuenta para el cálculo de enlaces intersatelitales. El espectro de radiación solar se extiende desde el ultravioleta al infrarrojo, con un pico en la parte visible del espectro. Otras fuentes de ruido como los planetas, la luna, y el ruido de fondo de la tierra tienen radiaciones similares, mientras que la radiación del sol es mucho más alta y su campo estelar más bajo. El campo estelar es un área en el cielo que incluye un número determinado de estrellas, si fuéramos capaces de ver sólo una estrella individual, encontraríamos una brillantez similar a la del sol, pero un campo de estrellas está compuesto de muchas fuentes pequeñas de luz, las estrellas, contra un área oscura que no tiene nivel de ruido de fondo.

El diseño de un enlace satelital requiere una selección cuidadosa de las variables del subsistema de enlace de tal forma que se cumplan con los requerimientos de desempeño. Uno de los elementos más importantes para la decisión es el tipo de modulación, y para un enlace intersatelital, los parámetros asociados son las

potencias de transmisión y recepción de las antenas que comunicaron a ambos satélites, así como sus características.

La ecuación de enlace es la forma más aproximada de predecir el desempeño del enlace, y normalmente se usa en forma logarítmica, como sigue:

$$M = 10 \log P - L_t + G_t - L_p - L_n - L - L_{LINK} + G_R - L_R - 10 \log(QE) - L_{proc} - 10 \log(S_{req})$$

M Relación de la señal detectada entre la señal requerida para establecer un mínimo de requisitos de desempeño. (dB)

P Potencia de salida de la fuente emisora o transmisor. (W)

L_t Pérdidas en el sistema de la antena transmisora (dB). Estas pueden ser pérdidas en los cables o las guías de onda alimentadoras, por ejemplo.

G_t Ganancia de la antena transmisora (dB)

Esta es la relación de la potencia radiada por la antena en una determinada dirección sobre la potencia radiada por una antena isotrópica.

La ganancia de un reflector parabólico está dada por:

$$G = \frac{4\pi A \eta}{\lambda^2},$$

donde A es el área de la antena en m^2 , η es la eficiencia y λ la longitud de onda.

L_p Pérdida por errores de apuntamiento del haz transmisor (dB).

L_n Eficiencia del frente de onda de la antena transmisora (dB)

L Pérdidas por propagación en el espacio libre (dB), dentro de las cuales tenemos fenómenos como absorción, difusión o difracción, refracción, y rotación del plano de polarización de la onda electromagnética. Estos fenómenos básicamente dependen de la longitud de la trayectoria. Aún así, la mayoría de estos fenómenos se tienen en presencia de la atmósfera, por lo que su efecto en enlaces intersatelitales es prácticamente nulo.

L_{LINK} Pérdidas adicionales, como pérdidas por polarización y atenuación media (dB)

G_R Ganancia de la antena receptora (dB)

L_R Pérdidas de la antena receptora (dB)

QE Eficiencia de detección de un detector de energía

L_{proc} Pérdidas por el procesamiento electrónico del manejo de datos (dB)

S_{req} Señal requerida para el desempeño mínimo dependiendo del ruido del enlace y el ruido del detector.

Para el cálculo de enlaces intersatelitales, tenemos las siguientes ecuaciones las cuales son para enlaces entre satélites geoestacionarios [18].

$$\begin{aligned} S &= 2r_g \sin(\alpha/2) = 84329 \sin(\alpha/2) && \text{km} \\ 20 \log_{10} S &= 20 \log_{10} [\sin(\alpha/2)] + 98.52 && \text{dBkm}^2 \\ L &= 20 \log_{10} [\sin(\alpha/2)] + 20 \log_{10} f + 190.97 && \text{dB} \\ W &= \text{PIRE} - 20 \log_{10} [\sin(\alpha/2)] - L_{add} - 169.52 && \text{dBW/m}^2 \end{aligned}$$

S	Distancia entre satélites
α	Distancia angular entre satélites
L	Pérdidas en el espacio libre
f	Frecuencia
W	Nivel de iluminación, densidad de flujo
L_{add}	Pérdidas adicionales en la trayectoria
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente

Para satélites que no se encuentran en la órbita geoestacionaria, el cálculo de enlace no es constante como en el caso geoestacionario, ya que los satélites LEO se mueven rápidamente respecto a una estación terrena o a un satélite geoestacionario, más debemos tomar en cuenta que respecto a otro satélite similar dentro de su misma órbita permanece fijo.

Los cálculos de enlace se deben calcular con la ecuación de la distancia S que sigue:

$$S = \sqrt{r^2 + R_c^2 - 2rR_c \cos \beta_0}$$

Siendo las pérdidas por espacio libre:

$$L = 20 \log_{10} S + 20 \log_{10} f + 190.97 \quad \text{dB}$$

Los cálculos de la ganancia de antenas son independientes de la altitud, sin embargo, el ancho de haz casi siempre se incrementa en altitudes bajas, por lo que resulta en una menor ganancia de antena.

3. PANORAMA DE LA TECNOLOGÍA LASER

3.1. ANTECEDENTES

La palabra LASER es un acrónimo del inglés “Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation”, que significa *amplificación de luz por emisión estimulada de radiación*, lo cual explica en términos generales, el concepto físico del láser.

Existen varios tipos de láseres, clasificados según el medio o material empleado en su construcción, o de acuerdo a su modo de operación o excitación, como se verá más adelante. Independientemente del tipo, la acción láser ocurre siguiendo principios comunes, los cuales se mencionarán a forma de antecedente.

Como se sabe, los átomos constan de un núcleo, cargado positivamente, y electrones alrededor de éste, con carga negativa y con una determinada energía que varía de acuerdo a la distancia con el núcleo. Normalmente, los electrones se sitúan en los niveles de energía más bajos disponibles; sin embargo, pueden ser llevados a un nivel de energía mayor por medio de un proceso de excitación. (Figura 3.1).

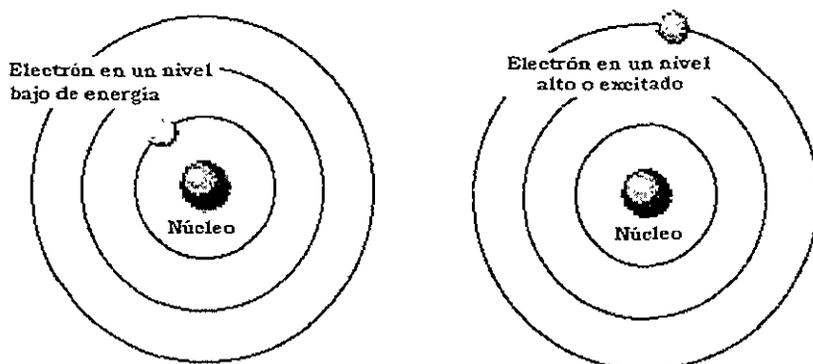


Figura 3.1. Diagrama de los niveles de energía de un electrón.

El proceso de excitación es un pre-requisito para la acción del láser. Esto se logra mediante colisiones entre electrones y demás partículas, reacciones químicas o aceleración de los electrones, entre otros.

Las partículas excitadas pueden descargar el exceso de energía por medio de procesos no radioactivos como colisiones con otros átomos o moléculas o emitiendo un fotón¹⁷. Esto ocurre cuando un electrón decae espontáneamente de un nivel de energía a otro de energía menor, en un proceso llamado emisión espontánea (Figura 3.2a). La energía del fotón (E) es proporcional a la frecuencia de la luz emitida y equivale a:

$$E = h\nu = E_2 - E_1$$

donde:

- h = Constante de Planck.
- ν = Frecuencia de la luz láser.
- E_1 = Energía del nivel menor.
- E_2 = Energía del nivel mayor.

Este proceso no ocurre instantáneamente. Los electrones residen en el nivel de energía mayor por un cierto periodo de tiempo antes de que caigan espontáneamente a un nivel de energía menor.

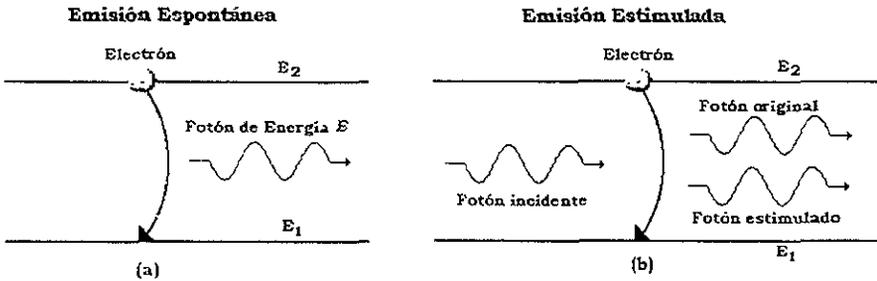


Figura 3.2. (a) Emisión espontánea y (b) Emisión estimulada.

Es también posible forzar una transición de un estado a otro por medio de un fotón; es decir, un fotón con determinada energía puede forzar o estimular un electrón para que se mueva entre dos niveles de energía, emitiendo otro fotón de la misma energía,

¹⁷ Foton: Partícula de luz

idéntico en fase, dirección y longitud de onda, que es lo que se denomina como emisión estimulada (Figura 3.2b).

La emisión estimulada origina fotones que se encuentran en la misma frecuencia y en la misma fase. La propiedad que se refiere a tener un grupo de fotones a exactamente la misma frecuencia se denomina monocromaticidad, mientras que la propiedad de tener un grupo de fotones a la misma fase se llama coherencia. La luz láser ideal entonces, es monocromática y coherente, ya que está formada por grupos de fotones con las características antes mencionadas.

La posibilidad de que ocurra una emisión estimulada es muy baja, debido a que las partículas tienden a estar en el nivel de energía más bajo disponible. En condiciones normales, o en equilibrio termodinámico, la población de una partícula tiende a disminuir al aumentar su energía, lo que significa que siempre habrá mayor población en los niveles de energía menores. De esta forma, es más factible que un fotón sea absorbido por una partícula de un nivel bajo a que sea estimulado por otro en un nivel mayor y, por tanto, domina la emisión espontánea.

Para que ocurra una emisión estimulada entonces, es necesaria una “inversión de población” (Figura 3.3), lo que significa que en una transición, la población de un nivel alto debe ser mayor que la de un nivel bajo; así, un fotón podrá estimular la emisión de un estado excitado.

La inversión de población se puede lograr, como se propuso en 1958, con una cavidad óptica formada por dos espejos de alta reflectividad: uno de estos espejos es totalmente reflector, y el otro es parcialmente reflector y parcialmente transmisor, con lo que se genera un mecanismo de retroalimentación de fotones en el medio, manteniendo así la inversión de población y produciendo las condiciones necesarias para la amplificación de la emisión estimulada de energía radiante. El resultado es que la emisión estimulada se concentra en un haz que oscila entre los dos espejos y entonces, se genera la luz láser.

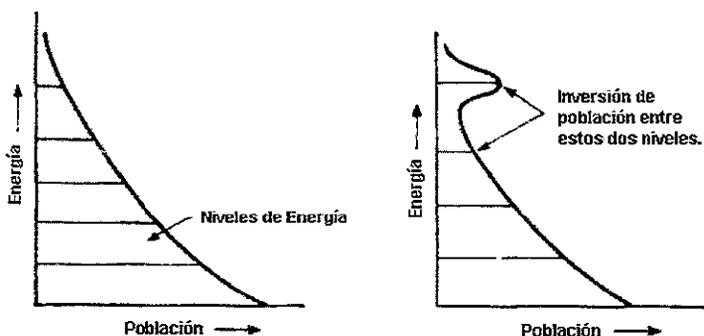


Figura 3.3. Distribución de población contra los niveles de energía: (a) en estado de equilibrio y; (b) durante una inversión de población.

Se puede decir entonces, que un láser es una fuente de luz monocromática de haz angosto y coherente (con la misma fase) correspondiente a la parte del espectro de la luz visible, el infrarrojo o el ultravioleta [19][20].

Generalmente, un láser consiste en tres componentes importantes: una cavidad óptica, un sistema de "bombeo" o excitación y un medio donde se genera la luz (Figura 3.4).

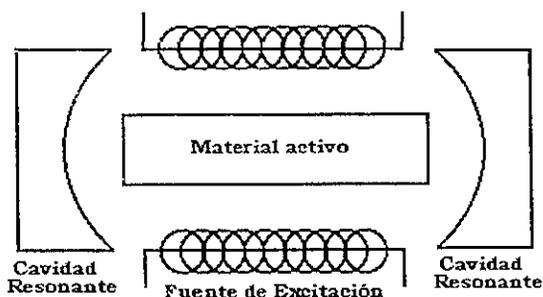


Figura 3.4. Principales componentes de un láser.

La *cavidad óptica o resonante* se requiere para proporcionar la amplificación deseada en el láser, ya que proporciona un camino de regeneración para los fotones. Esta cavidad está definida por un par de espejos situados uno en cada lado, los cuales pueden estar en varias configuraciones, como se muestra en la figura 3.5. La

paración entre ambos espejos, es decir la longitud de la cavidad, es varias veces mayor que la longitud de onda del láser, por lo que es posible la presencia de varios modos de propagación.

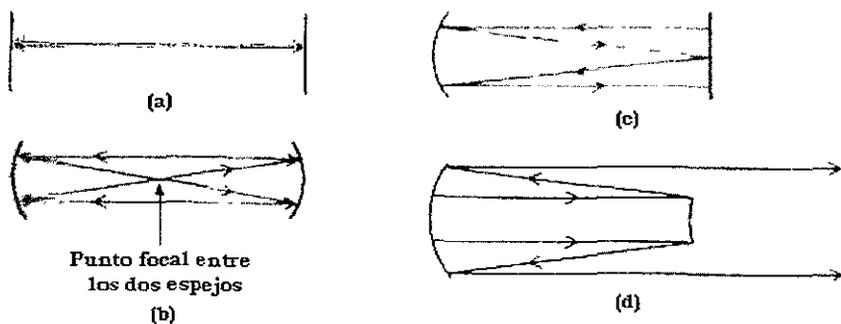


Figura 3.5. (a) Resonador de planos paralelos; (b) Resonador cofocal (estable); (c) Resonador hemicofocal (estable); (d) Resonador inestable cofocal de rama positiva.

La *fente o sistema de bombeo* proporciona la energía para establecer los niveles de energía que se necesitan para que pueda ocurrir la emisión estimulada. Por lo general, se puede excitar ópticamente, con lámparas u otros láseres; o bien, eléctricamente, usando diodos semiconductores; o con descargas eléctricas (como los láseres de gas), e incluso con reacciones químicas.

El *material activo o medio* es el lugar donde se realiza la emisión estimulada. Este material puede ser un sólido, un líquido, un gas o un semiconductor, lo cual da lugar a la existencia de diferentes tipos de láseres, con sus respectivas características y aplicaciones.

3.2. TIPOS DE LÁSER

Como se mencionó anteriormente, los láseres se pueden clasificar de acuerdo al material de "laseo"¹⁸ utilizado en: láseres de estado sólido, de gas, de colorante o semiconductores.

El material de laseo o el medio activo, determina principalmente la longitud de onda del láser, el método de bombeo, la magnitud de la salida láser y su eficiencia. Es por ello que el nombre del láser comúnmente se deriva del nombre del medio activo.

Los láseres también se pueden clasificar de acuerdo a su modo de operación temporal, los cuales se distinguen por la tasa a la cual se entrega energía. De esta forma pueden ser: láseres de onda continua, de pulso simple o modo normal, de pulso simple comprimidos (single pulse Q switched lasers), de pulsos repetitivos y láseres de modo bloqueado.

Los láseres de onda continua operan con un haz de potencia promedio estable, mientras que los de modo normal emiten pulsos de determinada duración. Los láseres de pulso simple comprimidos son el resultado de un retardo interno en la cavidad, que permite al medio almacenar un máximo de energía potencial. Los láseres pulsados repetitivos involucran un desempeño de láser pulsado, pero a una tasa fija de pulsos. Por último, los láseres de modo bloqueado operan como resultado de modos resonantes de la cavidad óptica que pueden afectar las características del haz de salida.

3.2.1. Láseres de estado sólido

Un láser de estado sólido es aquel que utiliza como medio activo un sólido no conductor, un material cristalino o un vidrio dopado con algún elemento que pueda emitir luz láser. Los láseres de estado sólido son comúnmente robustos, sencillos en cuanto a mantenimiento y capaces de alcanzar grandes potencias. Por lo general, el medio activo es un cristal dopado, como por ejemplo un cristal de zafiro dopado con cromo (rubí) o zafiro dopado con titanio, etc.

¹⁸ Laseo (lasing), término que se refiere a la acción de generar emisión estimulada

El ejemplo más común de este tipo de láser es el láser de Nd-YAG¹⁹, el cual emite un haz infrarrojo a la longitud de onda de 1.064 μm . El láser de Neodimio-YAG se excita ópticamente, ya sea por una lámpara de tungsteno o kriptón, y es capaz de alcanzar potencias de onda continua de hasta 1000 W. Estos láseres tienen la capacidad de que su frecuencia sea multiplicada por un factor de 2, 3 o 4, lo que equivale a la división de la longitud de onda entre los mismos factores, teniendo emisión en el espectro visible o ultravioleta.

Los láseres de neodimio tienen aplicaciones en la ciencia, la industria civil, la medicina y el equipamiento militar, siendo la principal razón su gran potencia y eficiencia. Se usan en aplicaciones de radar láser, espectroscopía láser, y aplicaciones de metrología láser, como mapeo del fondo marino. También se usan en el marcado de códigos o símbolos en ciertos materiales, fabricación electrónica, soldado y en la medicina, por ejemplo, en la cirugía de las cataratas.

Asimismo, el láser Nd-YAG ha sido también estudiado para comunicaciones en el espacio, gracias a dos factores importantes: la potencia de transmisión relativamente alta (varios cientos de miliwatts en promedio) y la alta confiabilidad esperada del sistema (con un tiempo de vida del transmisor mayor a 10^5 horas bombeando con un arreglo de diodos láser)[21].

3.2.2. Láseres de gas

Respecto a los láseres de gas, éstos usan un gas o una mezcla de gases en un tubo a baja presión. Se utilizan bajas presiones tanto para obtener una descarga eléctrica con una gran trayectoria mientras que los electrodos se encuentran a ambos lados del tubo, como para obtener un ancho espectral angosto que no se expanda por colisiones entre los átomos. Sin embargo, algunos tipos especiales de láseres utilizan gas a presiones elevadas.

Los láseres de gas se pueden dividir en tres grupos, según las partículas que forman su medio activo:

a. Átomos: El medio activo está compuesto de átomos de un gas neutral como el Helio-Neón o el vapor de cobre.

¹⁹ Nd-YAG: Neodimio en el granate de Itrio y Aluminio (Neodymium-Yttrium Aluminium Garnet)

- b. Iones: El medio activo está compuesto de un gas ionizado, como el ión de argón o el gas de helio-cadmio.
- c. Moléculas: Compuesto por moléculas de gas como el dióxido de carbono, el nitrógeno o los láseres excímeros²⁰.

El libre movimiento de las partículas en una mezcla gaseosa permite que la energía sea transferida a través del medio de diversas formas, ya sea por electrones, iones, o fotones, y por colisiones entre las partículas del gas. Asimismo, reacciones químicas y procesos dinámicos pueden producir partículas excitadas e inversión de población. Estos mecanismos sirven de base para la forma de excitación. Por ello, dentro de los láseres de gas, existen los excitados por descarga, por un haz de electrones, por un haz de iones, los excitados por radiofrecuencia y microondas, los excitados química u ópticamente, entre otros.

El primer láser de gas fue un láser de Helio-Neón, operando a una longitud de onda de 1152.27 nm, en el infrarrojo cercano. A pesar de esto, al láser de He-Ne se le conoce más operando a 632.8 nm, lo cual corresponde a un color rojo visible. Es uno de los láseres más usados actualmente, en lectores de códigos de barras, apuntadores de lápiz, hologramas, etc.

Otro láser importante dentro de esta categoría, es el láser de CO₂, el cual es uno de los más versátiles en el mercado. Emite una radiación infrarroja entre 9 y 11 μm, y puede producir potencias de salida continuas en un rango desde menos de 1 W para aplicaciones científicas hasta varios kilowatts para el trabajo de los materiales. También puede generar pulsos en intervalos de los nanosegundos a los milisegundos.

²⁰ Los láseres excímeros corresponden a una familia de láseres con características de salida comunes. Todos emiten potentes pulsos, los cuales pueden durar unos cuantos o varias decenas de nanosegundos, en longitudes de onda cercanas al ultravioleta. El término "excímero" se origina de la contracción de "excited dimer", que es la descripción de una molécula que consiste en dos átomos idénticos que sólo existen en estado excitado, por ejemplo, el He₂ y el Xe₂. Actualmente el término se usa para referirse a cualquier molécula diatómica y a veces hasta moléculas triatómicas. Las moléculas excímeras más importantes son los halos de gases raros, compuestos como el fluoruro de argón y el fluoruro de kriptón, entre otros, que no se encuentran naturalmente, pero pueden ser producidos al pasar una descarga eléctrica a través de una mezcla de gas adecuada

Esta versatilidad se debe al hecho de que existen diferentes tipos de láseres de dióxido de carbono. Mientras todos comparten el mismo medio activo, difieren en su estructura interna y así, en sus características funcionales.

Debido a esto, los láseres de CO₂ sirven tanto en ambientes industriales como de laboratorio, por ejemplo: para cortar y soldar metales y no metales (plásticos, cerámicas, etc); para espectroscopía y fotoquímica, para radares, y para cirugías en medicina, entre otras aplicaciones.

También, el láser de CO₂ ha sido estudiado para enlaces intersatelitales por más de dos décadas. Las ventajas principales de un sistema de láser de CO₂ con receptor heterodino para este uso son la alta potencia de salida del láser y la alta sensibilidad del receptor. En la sección 3.4 se habla con más detalle de sistemas ópticos usados en enlaces intersatelitales.

3.2.3. Láseres de colorante o líquidos

Los láseres líquidos usan comúnmente un colorante (dye) orgánico complejo en una solución líquida o una suspensión. La característica más importante de estos láseres es la gran flexibilidad en su operación, así como la capacidad de entonación²¹ que tienen. La longitud de onda de salida de un láser de este tipo puede ajustarse desde el ultravioleta cercano hasta el infrarrojo cercano; el uso de cristales que doblan la frecuencia pueden extender la emisión hasta el ultravioleta. Los láseres de colorante se pueden ajustar para operar sobre un espectro de ancho de banda extremadamente angosto, produciendo luz ultrapura para estudios de propiedades ópticas de materiales en regiones angostas de longitud de onda. Pueden también producir pulsos ultracortos, con duraciones cercanas a los picosegundos.

Por su gran versatilidad, este tipo de láser es muy complejo, tanto en su construcción como en su cuidado y mantenimiento. El precio depende de la complejidad, pero sobrepasa los \$2000 USD.

El colorante más usado es la Rodamina 6G, que proporciona cerca de 200nm de ancho de banda en la porción de los 620 nm del espectro.

²¹ Entonación: Se refiere a la capacidad que tiene la longitud de onda de un laser a ser ajustada según las necesidades del usuario.

La vasta mayoría de este tipo de láseres se ha usado para investigación y desarrollo, principalmente, pero en los últimos años se han ido incrementando las aplicaciones en tratamientos médicos, por ejemplo. Asimismo, estos láseres tienen amplia aplicación en la espectroscopía atómica y molecular de alta resolución.

3.2.4. Láseres semiconductores

Por último, los láseres semiconductores (referidos comúnmente como diodos láser) consisten en dos capas de material semiconductor. Estos láseres representan a una amplia familia de dispositivos, con diferentes estructuras, y fabricados con una gran variedad de materiales.

Los primeros láseres semiconductores fueron fabricados en 1962, y desde esa época, el desarrollo de éstos ha sido acelerado y ha encontrado las más diversas aplicaciones.

Todos los diodos láser semiconductores, como su nombre lo indica, están hechos de material semiconductor, y tienen las características eléctricas de un diodo. En un diodo, se hace pasar una corriente eléctrica a través de él, y ésta hace que los portadores de corriente se recombinen en la unión entre las regiones con diferentes dopajes. Este proceso de recombinación libera energía en forma de luz en algunos semiconductores. El silicio y el germanio no tienen el nivel de energía necesario para emitir luz, por lo que los diodos láser están hechos de semiconductores binarios como el arseniuro (arsenide) de galio o semiconductores más complejos como los compuestos de tres elementos (ternarios) o cuatro elementos (cuaternarios).

En la tabla 3.1 se enlistan los compuestos semiconductores más importantes para láseres y su longitud de onda normal. Los compuestos binarios como el GaAs tienen una longitud de onda fija. Al agregar uno o más elementos, cambian las características del semiconductor y así la longitud de onda.

Las aplicaciones para los diodos láser se han incrementado enormemente según la variedad, las potencias que manejan y los precios que disminuyen. Muchas de las aplicaciones en general son: manejo de información, que incluye lectores de discos compactos, comunicaciones por fibra óptica e impresoras láser. Otras aplicaciones son medición e inspección, pantallas, tratamientos médicos, instrumentación en general, como fuentes para otros láseres, sistemas militares e investigación y

desarrollo en general. También se han estudiado para su aplicación en enlaces intersatelitales.

Tabla 3.1. Algunos materiales de láseres semiconductores.

Compuesto ²²	Longitud de Onda (nm)
AlGaInP	630-680
Ga _{0.5} In _{0.5} P	670
Ga _{1-x} Al _x As	620-895
GaAs	904
In _{0.2} Ga _{0.8} As	980
In _{1-x} Ga _x As _y P _{1-y}	1100-1650
In _{0.73} Ga _{0.27} As _{0.58} P _{0.42}	1310
In _{0.58} Ga _{0.42} As _{0.9} P _{0.1}	1550
InGaAsSb	1700-4400
PbEuSeTe	3300-5800
PbSSe	4200-8000
PbSnTe	6300-29000
PbSnSe	8000-29000

Uno de los más recientes e importantes avances en láseres semiconductores es el "láser azul". En 1996, un equipo de investigadores japoneses anunciaron que habían desarrollado un láser semiconductor de GaN que proporcionaba una salida continua

²² Algunos compuestos son etiquetados comúnmente en la forma: Ga_{1-x}Al_xAs, donde la x denota la fracción de un elemento, en este caso, aluminio. El número de átomos de galio y aluminio deben ser iguales al número de átomos de arsénico

de luz azul a temperatura ambiente. Estos diodos tenían una particular limitante: tenían un tiempo de vida operacional de tan solo 27 horas.

Un año después, el mismo equipo guiado por Shuji Nakamura de las Industrias Químicas Nichia en Tokushima, reportó que el láser había durado más de 100 veces el tiempo anterior en pruebas a temperatura ambiente.

Los diodos láser basados en InGaN, emiten a 400 nm y tienen una potencia de salida de 5 mW y operan a 40 mA y 5V. El tiempo de vida estimado es de 10000 horas a temperatura ambiente.

Este láser permitirá una mayor densidad de almacenamiento de datos en un videodisco digital (DVD), cerca de 12 GB por lado, lo que equivale a tres o cuatro veces más de la capacidad actual, y suficiente espacio en disco para almacenar seis horas de video y audio con resolución estándar. Asimismo, este láser también puede ser usado para impresoras láser, litografía láser, equipo médico, grabadoras de video digital, displays y sensores, sistemas de comunicación bajo el agua, así como una fuente de luz láser.

La importancia de este láser radica en que la longitud de onda de la luz azul es sólo la mitad de la del láser rojo y el láser infrarrojo, que son los más utilizados, lo cual significa lo doble en frecuencia, y por tanto, mayor capacidad de almacenamiento y mayor velocidad.

3.2.5. Resumen de los láseres más comunes

En la tabla 3.2 se concentran los láseres más comunes, las longitudes de onda en las que radian, su modo de operación temporal, la potencia promedio que entregan y sus principales aplicaciones, mientras que en la figura 3.6. se muestran de forma gráfica y comparativa sus longitudes de onda de emisión.

Tabla 3.2. Resumen de los láseres más comunes

TIPO DE LÁSER	LÁSER	MEDIO	LONGITUD DE ONDA (nm)	TIPO DE SALIDA	POTENCIA PROMEDIO	APLICACIONES																				
						A				B				C		D	E									
						Copuladores	Impresoras	Displays	Espectáculos Luminosos	CD/DVD	Comunicaciones	Alimentación	Recorte de materiales	Centros Drilling	Balaneo Dinámico	Pruebas no destructivas	Sellado	Soldadura	Procesamiento de materiales	Litografía	Oftalmología	Oncología	Cirugía	Cirugía Estética	Espectroscopia	Otros
Excimero	Argón Cloro	UV	175																							
	Argón Flúor	UV	193.3	Pulsada	Decenas de watts																					
	Kriptón Cloro	UV	222	Pulsada	Pocos watts																					
	Kriptón Flúor	UV	248.4	Pulsada	Más de 100 W																					
	Xenón Bromo	UV	281.8																							
	Xenón Cloro	UV	308	Pulsada	Decenas de watts																					
	Xenón Flúor	UV	351																							
Gas	Helio Cadmio	UV	325	Continua	Decenas de miliwatts																					
		Violeta	441	Continua	Más de 0.1 W																					
	Nitrógeno	UV	337	Pulsada	Menos de 1 W																					
		Kriptón	Azul	476																						
			Verde	528																						
			Amarillo	568																						
		Rojo	647																							
	Argón	Azul	488	Continua	Decenas de watts																					
		Verde	514.5																							
		Verde	543.5																							
	Helio Neón	Amarillo	594	Continua	Decenas de watts																					
		Naranja	612																							
		Rojo	632.8																							
		NIR	1150																							
		MIR	3390																							
	Fluoruro de Hidrogeno	NIR	2700																							
		FIR	9600	Continua o Pulsada	Decenas de kilowatts																					
	Dióxido de Carbono	FIR	10600																							
Xenón		Blanco	Multiple																							

Tabla 3.2. (Continuación) Resumen de los láseres más comunes

TIPO DE LASER	LASER	MEDIO	LONGITUD DE ONDA (nm)	TIPO DE SALIDA	POTENCIA PROMEDIO	APLICACIONES																
						A					B			C		D	E					
						Copadoras	Impresoras	Displays	Espectáculos Luminosos	CD/DVD	Comunicaciones	Alimentación	Recorte de materiales	Corte/Drilling	Balancos Dinámicos	Pruebas no destructivas	Sellado	Soldadura	Procesamiento de metales	Litografía	Oftalmología	Odonología
Estado Sólido	Nd-YAG de frecuencia doblada	Verde	532	Pulsada	Hasta 50 W																	
				Continúa	Hasta varios watts																	
	Rubi (Cr-AlO ₃)	Rojo	694.3	Pulsada	Hasta unos pocos watts																	
	Alexandrita	NIR	700-815	Pulsada	Decenas de watts																	
	Titanio en Zafiro	NIR	840-1100	Continúa	Watts																	
	Nd-YLF	NIR	1053		Decenas de watts																	
	Nd-YAG	NIR	1064	Continúa	Hasta kilowatts																	
	Nd-YAG	NIR	1330	o pulsado	Unos pocos watts																	
	Holmio-YLF	MIR	2060																			
	Holmio-YAG	MIR	2100																			
Erbio	MIR	1504	Pulsada	1 W																		
Erbio-YAG	MIR	2940	Pulsada	Decenas de watts																		
Semiconductor	Arsenuro de Galio (GaAs)	NIR	840																			
	Arsenuro de Galio Aluminio (GaAlAs)	VIS/NIR	670-830	Continúa	A varios watts																	
Líquido	Coumarin C30	Verde	504																			
	Colorante Rodamina 6G (ajustable)	VIS	570-650																			
Vapor Metálico	Vapor de Cobre	Verde	510.5	Pulsada	Decenas de watts																	
		Amarillo	570																			
	Vapor de Oro	Rojo	627	Pulsada																		

MEDIO
 UV Ultravioleta (100 a 380-400 nm)
 VIS Visible (380-400 a 760-780 nm)
 NIR Infrarrojo Cercano (760-780 a 1400 nm)
 MIR Infrarrojo Medio (1400 a 3000 nm)
 FIR Infrarrojo Lejano (3000 nm a 1 mm)

APLICACIONES
 A Comerciales
 B Industriales
 C Médicas
 D Investigación Científica
 E Militares

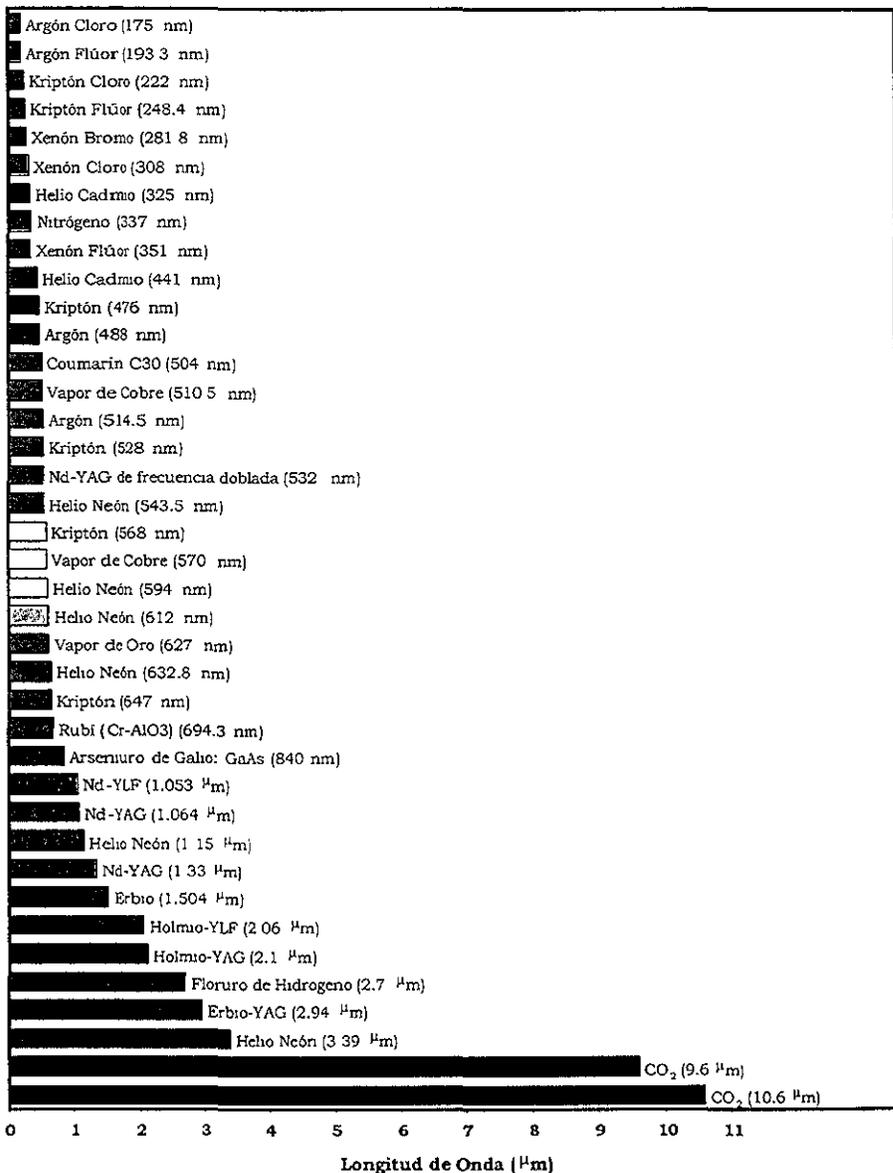


Figura 3.6. Tipos de láser y longitud de onda a la que operan.

3.3. LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS EN EL ESPACIO LIBRE

Las comunicaciones ópticas en el espacio libre integran un tema que se ha estudiado e investigado por casi 30 años. En un inicio, como la mayor parte de los desarrollos en la tecnología de comunicaciones, surgieron como proyectos con aplicaciones militares. En los últimos años, éstas han sido desarrolladas por las Agencias Espaciales, los Gobiernos y empresas privadas, gracias al gran avance que ha tenido la tecnología láser, básicamente para usarlas en aplicaciones comerciales en comunicaciones móviles y servicios globales multimedia [22].

El mercado actual para las comunicaciones ópticas en el espacio es principalmente el de los enlaces intersatelitales (ISL). Asimismo, también existen estudios sobre los enlaces espacio-superficie terrestre de alta velocidad, a pesar de que los efectos de propagación debidos a la atmósfera y el clima hacen de estos enlaces más difíciles. El proyecto GeoLite que se mencionó en la sección 1.4 es un ejemplo.

Por otra parte, las ventajas y desventajas de un sistema óptico en el vacío del espacio son varias. Un sistema óptico tiene comúnmente un ancho de haz más angosto que un sistema de RF. Esto es una ventaja en el sentido de que un ancho de haz angosto significa que la interferencia entre dos satélites adyacentes se reduce, aunque a coste de que se necesita un equipo de apuntamiento, adquisición y rastreo mucho más preciso para lograr el enlace.

Una desventaja secundaria, pero no menos importante, es que, a diferencia del espectro radioeléctrico, el espectro óptico no está regulado por ninguna agencia nacional o internacional.

3.4. LÁSERES PARA ENLACES INTERSATELITALES

Los diferentes tipos de láser que se pueden usar para enlaces intersatelitales han sido estudiados y evaluados. En la tabla 3.3, se resumen las tecnologías láser que se pueden usar y sus características.

Tabla 3.3. Características de los sistemas ópticos de comunicaciones para enlaces intersatelitales

CARACTERÍSTICA	SISTEMA					
	CO ₂	Nd	InGaAsP	GaAlAs	GaAlAs WDM	GaAlAs Heterodino
Potencia de transmisión	muy alta	alta	alta	media	alta	baja
Eficiencia de transmisión	alta	media	baja por la potencia del amplificador	muy alta	muy alta	muy alta
Sensibilidad del receptor	muy alta	media	media	media	alta	muy alta
Complejidad del Transmisor	muy alta	muy alta	muy alta	baja	alta	alta
Complejidad del Receptor	muy alta	baja	baja	baja	alta	muy alta
Eficiencia en la Modulación Digital	baja	media	muy alta	muy alta	muy alta	muy alta
Eficiencia en la Modulación Analógica	baja	baja	media	media	muy alta	muy alta
Requerimientos de disipación de calor	alto	muy alto	alta	baja	bajo	baja
Calidad del haz láser	excelente	bueno	pobre	pobre	pobre	pobre
Estabilidad del haz láser	excelente	bueno	bueno	bueno	bueno	bueno
Requerimientos de apuntamiento y rastreo	bajo	muy alto	alto	alto	alto	media
Implementación de redundancia	muy complicado	muy complicado	complicado	muy simple	complicado	complicado
Confiabilidad del sistema esperado	no se sabe	alta	alta	muy alta	muy alta	muy alta
Requerimientos especiales	enfriamiento del detector	-	amplificador	-	WDM	alta estabilidad

4. SISTEMAS EXPERIMENTALES CON ENLACES INTERSATELITALES A FRECUENCIAS ÓPTICAS

4.1. PROYECTO ARTEMIS/SPOT 4

Entre el equipo que desarrolló al satélite ARTEMIS, se encuentra Matra Marconi Space, como contratista principal del proyecto SILEX, es decir, de la carga óptica del satélite [23][24]. Por medio de esta carga óptica, será posible la transmisión de datos sobre un enlace óptico desde un satélite de órbita baja, a través del satélite geostacionario ARTEMIS, a otros puntos terrestres muy alejados de la zona sobrevolada por el SPOT-4 de percepción remota (véase la figura 4.2).

El satélite SPOT-4 pertenece a la familia de satélites de observación terrestre o percepción remota SPOT, diseñados por el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES) y operados por SPOT Image. Fue lanzado en marzo de 1998 llevando consigo la terminal PASTEL²³, que también es parte del experimento SILEX. (Figura 4.1.).



Figura 4.1. Satélite SPOT-4 de órbita baja.

4.2. SILEX: CARGA ÓPTICA DEL SATÉLITE ARTEMIS

4.2.1. Descripción

La comunidad espacial europea siempre ha estado interesada en las comunicaciones ópticas en el espacio libre, por lo que se han realizado diversas investigaciones referentes a láseres desde hace más de 20 años, y a mediados de los años 80, se presentó el proyecto SILEX, un sistema pionero en su tipo, sin ser militar, que usa

²³ PASTEL: Passenger SPOT de Télécommunication Laser

láseres para transmitir información en el espacio libre. Dos terminales de SILEX se diseñaron y desarrollaron: PASTEL y OPALE²⁴; este último irá a bordo del satélite ARTEMIS [25]. Un esquema de los enlaces se puede ver en la figura 4.2.

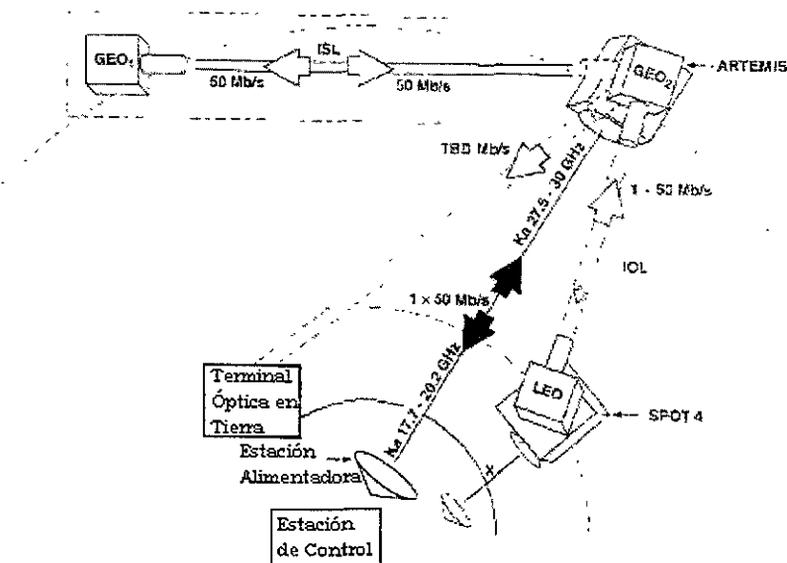


Figura 4.2. Enlaces del satélite ARTEMIS

Ambas terminales permitirán que las imágenes tomadas por el satélite SPOT-4 se transmitan al satélite ARTEMIS via enlace óptico a una velocidad de 50 Mbps y después a la estación terrena del SPOT-4, a través de un enlace en banda Ka del satélite ARTEMIS, como se ve en la figura 4.3a. De la misma forma, la terminal SILEX del ARTEMIS dará servicio también a un experimento entre éste y un satélite de órbita baja japonés, el OICETS²⁵, en el que la velocidad de transmisión de los datos hacia el ARTEMIS será la misma de 50 Mbps, pero adicionalmente, habrá un enlace óptico del ARTEMIS al OICETS, por medio del cual se podrá enviar un flujo de datos a 2 Mbps de la tierra al satélite japonés via ARTEMIS. A diferencia del proyecto con el SPOT-4, el

²⁴ OPALE: Optical Payload for Intersatellite Link Experiment

²⁵ OICETS: Optical Interorbit Communications Engineering Test Satellite

proyecto japonés es bidireccional. (Figura 4.3.b). De este proyecto se habla más en detalle en la sección 4.2.

Como ya se ha indicado en otras secciones de esta tesis, la principal ventaja de usar longitudes de onda ópticas para los enlaces entre satélites es la capacidad que tienen para obtener ganancias extremadamente altas en las antenas con aperturas relativamente pequeñas y, en consecuencia, el hecho de usar una sola portadora con potencia limitada. En el caso de SILEX, una transmisión de 50 Mbps a una distancia de 42000 km se logra con una potencia óptica de tan sólo 60 mW, aproximadamente. SILEX usa como antena un telescopio de 25 cm de diámetro en ambas terminales, el cual proporciona una ganancia de antena de más de 100 dB [26].

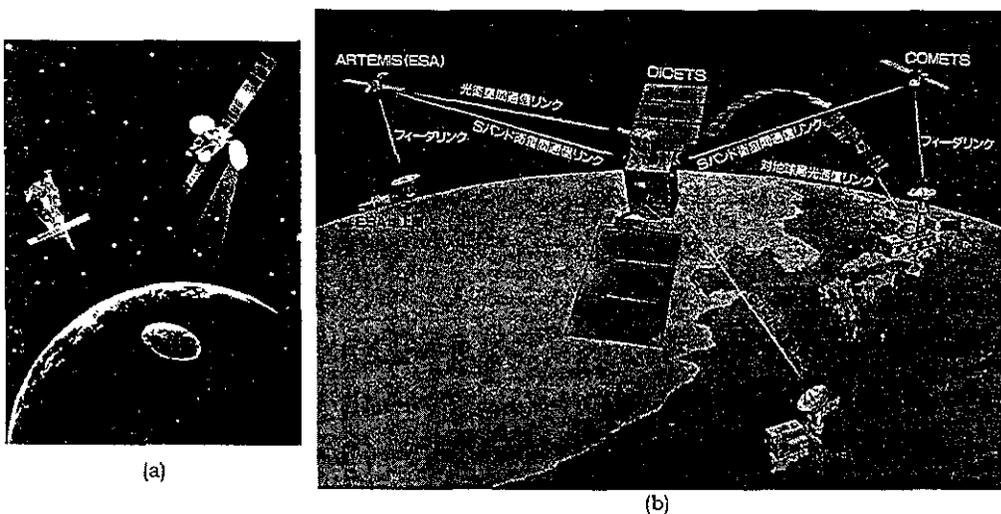


Figura 4.3. Proyecto Artemis: (a) ARTEMIS/SPOT-4 (b) ARTEMIS/OICETS

La desventaja más relevante de este sistema radica en la exactitud que se requiere para alinear receptor y transmisor, debido a que los haces son muy angostos. El haz de comunicación de las terminales del SILEX tiene un ancho cercano a $8 \mu\text{rad}$, lo cual equivale a una zona iluminada de menos de 400 m de diámetro a una distancia de 42000 km. Para prevenir pérdidas de potencia, el haz óptico debe ser apuntado a la otra terminal con una precisión de unos pocos microradianes, lo cual se torna difícil debido a que cualquier perturbación o microvibración llega a afectar el sistema.

Durante la operación, PASTEL será usado para enviar imágenes del SPOT-4 a ARTEMIS por medio de un enlace óptico. Suponiendo que PASTEL no estuviera disponible, las imágenes del satélite sólo podrán ser enviadas a tierra inmediatamente después de la adquisición si el satélite se encuentra en el rango de la estación receptora, o de lo contrario, debe ser almacenada en grabadoras a bordo o en la memoria de estado sólido, que son los dispositivos que envían los datos cuando el satélite de percepción remota se encuentra otra vez en el rango de la estación receptora.

En cambio, usando PASTEL, será posible enviar las imágenes tomadas por el SPOT a cualquier parte de la superficie terrestre dentro del rango de las terminales PASTEL y OPALE.

4.2.2. Tecnología

El rango de longitud de onda seleccionado para el experimento ha sido el de 800 a 850 nm, y el diseño del sistema se basa en varios componentes claves:

- Diodos láser de GaAlAs de dos tipos: un diodo láser monomodo a 120 mW de potencia pico para el canal de comunicación, y una combinación de varios diodos láser de alta potencia (500 mW) para la señal brillante, divergente y no modulada de guía o radiofaro (beacon), usada en la secuencia de adquisición.
- Dispositivos de acoplamiento de carga (CCD), que son los sensores que detectan la incidencia angular del haz óptico y mantienen la precisión del apuntamiento. Se usan dos tipos de CCDs, un sensor con gran ancho de vista (288x288 pixeles) para detectar la posición de la otra terminal durante la secuencia de adquisición, y otro de matriz menor (14x14 pixeles) con lectura de alta frecuencia.
- Fotodiodos de Avalancha (APD) con factores de ruido altamente optimizados, lo que permite máximo desempeño en la comunicación con una señal recibida de poco nivel.

4.2.3. Arquitectura de la terminal óptica PASTEL y OPALE

La terminal óptica está dividida básicamente en dos partes, una aérea móvil y otra fija.

La parte *aérea móvil*, se encuentra montada sobre el lado superior del SPOT-4 y consiste en:

- Un telescopio
- Un banco óptico con un sistema de apuntamiento fino, un sensor de comunicaciones y diodos láser.
- Un sistema de control térmico para un control preciso de la temperatura.
- Un balancín de dos ejes que le permite girar y reorientarse.
- Los mecanismos que fueron necesarios en la fase de lanzamiento.

La parte *fija* incluye todos los sistemas electrónicos que no están necesariamente cerca de la parte móvil.

En general, la masa de la terminal óptica es cerca de 100 kg, divididos en 80 kg para la parte aérea y unos 20 kg para la parte fija.

La potencia consumida por la carga óptica será aproximadamente 150 W en el modo de comunicación.

4.2.4. Mecanismo de trabajo del SILEX

En forma general, las dos terminales ópticas llevan a cabo las siguientes operaciones [27]:

Fase de apuntamiento grueso

Involucra el movimiento al principio de la fase de adquisición de la terminal PASTEL (SPOT-4) de su posición de “standby” o reposo, de tal forma que es dirigida a la terminal OPALE (y viceversa). Estas direcciones de apuntamiento se predicen usando modelos de órbitas de los satélites ARTEMIS y SPOT-4 previamente cargados tanto en PASTEL como en OPALE.

Fase de adquisición

Después de la fase de apuntamiento grueso, el error de apuntamiento de cada terminal es mucho más grande que el ángulo de divergencia de los haces, por lo que se requiere

n procedimiento de ajuste. La estrategia de funcionamiento adoptada hace posible que se ajuste en un tiempo de menos de 239 segundos.

Fase de comunicación

Se usa ya sea para transmitir una señal específica generada por PASTEL a OPALE que asegure la calidad del enlace, o para transmitir imágenes del SPOT-4 para ser recibidas por la estación receptora en Toulouse, Francia.

Fase de regreso a "standby"

Después de la sesión de comunicación, cada terminal regresa a la posición de "standby".

4.2.5. Adquisición y apuntamiento.

Antes de establecer el enlace óptico, la posición de la otra terminal no se conoce con exactitud. En el caso de SILEX, la otra terminal estará en una zona incierta que se ve desde 42000 km bajo un ángulo de 5500 μ rad. Dado que el haz óptico tiene un ancho de sólo 8 μ rad, una maniobra de búsqueda se tiene que llevar a cabo. Con este propósito, la terminal geostacionaria en el ARTEMIS está equipada con un "beacon" óptico que genera, por medio de 19 diodos láser, una potencia óptica de 10 W que es transmitida en un haz de 750 μ rads. Para encontrar la terminal en la zona de 5500 μ rads, el haz beacon es escaneado sobre la zona de incertidumbre hasta que la otra terminal es iluminada por la señal de beacon. En este caso, la terminal LEO detectará la señal óptica y transmitirá, como respuesta, la señal de haz delgado hacia ARTEMIS. Cuando éste detecta la señal, ya no escaneará más y centrará la dirección de la transmisión hacia la terminal LEO. Una vez que el apuntamiento es lo suficientemente preciso, los haces de comunicación serán transmitidos y el sistema estará listo para empezar la transmisión de datos.

Con el fin de establecer un enlace óptico sobre una gran parte de su órbita, la terminal a bordo del SPOT-4 debe tener la capacidad de apuntar su telescopio sobre un gran rango angular.

Para este propósito, un balancín de dos ejes fue desarrollado, el cual no lleva tan solo el telescopio, sino también toda la cabeza óptica, lo que incluye los transmisores

ópticos, los receptores, los mecanismos de apuntamiento y la electrónica de control, la cual debe estar muy cerca de la parte óptica.

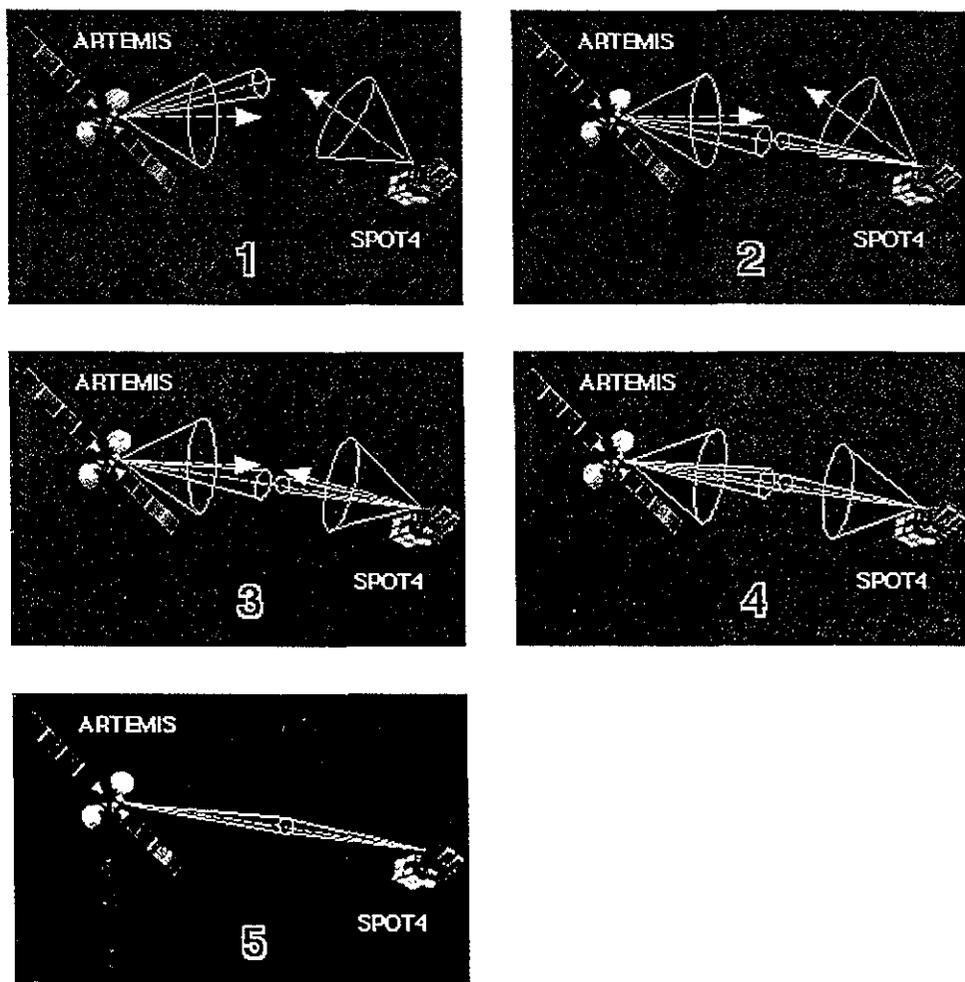


Figura 4.4. Proceso de adquisición y apuntamiento.

4.2.6. Centros de operación y control del satélite SPOT-4

El establecimiento de un enlace óptico de este tipo requiere una perfecta coordinación en la planeación, programación y la adquisición de la información. En el caso del experimento SILEX, este es operado por centros tanto del CNES como de la ESA.

Tabla 4.1. Centros de CNES

Centro	Función	Localización
CPR	Centro de programación del SPOT -4	Toulouse
CCMP	Centro de control del satélite SPOT-4	Toulouse
SRIP	Estación receptora de imágenes de PASTEL	Aussaguel, cerca de Toulouse

Tabla 4.2. Centros de la Agencia Espacial Europea:

Centro	Función	Localización
EMCS	Centro de control de la terminal PASTEL	Bélgica
AMCS	Centro de control para el satélite ARTEMIS y la terminal óptica OPALE	Italia
PTL	centro de valoración tecnológica del SILEX	Bélgica

Además, en las Islas Canarias, España, hay una estación terrena óptica (OGS) transmisora-receptora que será usada para establecer un enlace entre OPALE y el segmento terrestre. Se usará para validar la terminal OPALE y deberá, posterior y adicionalmente, recibir datos de fenómenos de perturbación atmosférica.

4.2.7. Resultados y futuro.

Mientras que el experimento se complete, es decir, mientras se espera el lanzamiento de la terminal OPALE con el satélite ARTEMIS, se apunta PASTEL a estrellas muy brillantes, como Sirio, lo cual será muy útil para la validación del escenario para PASTEL, de adquisición y rastreo.

A pesar de la falta de la otra terminal, se han llevado a cabo pruebas en órbita a la terminal PASTEL, lo que dio como resultado un desarrollo exitoso de todas las

calibraciones internas, adquisición y posicionamiento de las estrellas seleccionadas, y la caracterización de la interacción dinámica entre la plataforma huésped o “host” y la terminal.

Las estrellas que han sido usadas para el experimento fueron Arcturus, Betelgeuse y Deneb. Cada una fue adquirida y apuntada con éxito varias veces, en el primer intento. No hubo fallas en la adquisición, a pesar del hecho que la radiación de las estrellas era en ocasiones menor que la señal beacon mínima o la potencia era menor que la de las señales de telecomunicaciones programadas para OPALE.

5. SISTEMAS COMERCIALES EN PLANEACIÓN QUE EMPLEARÁN ENLACES INTERSATELITALES EN LA BANDA KA O EN FRECUENCIAS ÓPTICAS.

5.1. ANTECEDENTES

Actualmente las bandas más usadas son la C y la Ku, por lo que nuevos satélites geoestacionarios en estas bandas son cada vez más difíciles de lanzar debido a la interferencia que podrían causar con los ya existentes. Esto ha dado pie al desarrollo de varios proyectos de satélites geoestacionarios en banda Ka, principalmente para servicios multimedia, que a pesar de las fuerte desventajas de atenuación por lluvia que existen en esta banda, son importante por el ancho de banda que ofrecen.

Ejemplos de estos satélites, básicamente experimentales son los lanzados por países europeos, como el Italsat 1 y 2, y el japonés Sakura CS, CS-2A, CS-2B, CS-3A y CS-3B, así como el ETS-VI. Estados Unidos lanzó el ACTS en 1993. Todos estos satélites han demostrado que a pesar de las desventajas de atenuación por lluvia, existen estrategias para mitigarlas.

Así, se han solicitado frecuencias y posiciones orbitales ante la FCC²⁶, la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos para el desarrollo y construcción de sistemas comerciales de este tipo, tanto en la banda Ka como en bandas superiores de frecuencia, como la Q y la V. En Europa y Asia también hay varios proyectos similares, pero a manera de ejemplo aquí sólo mencionaremos los registrados ante la FCC, ya que son muchos y dan una idea del escenario competitivo que ocurrirá en las primeras décadas de este siglo para brindar servicios de banda ancha. La mayor parte de estos proyectos contempla el uso de enlaces intersatelitales, ya sea en la banda Ka o en frecuencias ópticas; dichos sistemas se muestran concentrados, para fines comparativos, en las tablas 5.1, 5.2 y 5.4. [28]

²⁶ FCC Federal Communications Commission

5.2. SISTEMAS DE SATÉLITES NO GEOESTACIONARIOS EN BANDA KU.

Los sistemas en banda Ku, como ya se mencionó, son muy utilizados para satélites en órbita geoestacionaria. Las frecuencias disponibles para servicios satelitales fijos en esta banda están entre los rango de 12.75 a 13.25 GHz y 13.75 a 14.8 GHz para enlaces de subida y de 10.7 a 12.75 y 17.3 a 17.7 GHz para enlaces de bajada. Debido a la saturación de la órbita GEO, se han propuesto sistemas en otras órbitas, de tal forma que ante la FCC se solicitaron licencias para seis sistemas de satélites.

En la tabla 5.1 se resumen dichos sistemas, de los cuales se tienen noticias de SkyBridge y Teledesic:

SkyBridge es una constelación de 80 satélites LEO, a una altitud orbital de 1469 km, que ofrecerá diversos servicios, como conexión a Internet a alta velocidad con acceso inmediato a proveedores de servicios y contenidos, así como conexión directa a la red telefónica pública. Soportará aplicaciones multimedia, videoconferencia, comercio electrónico, enseñanza a distancia, telemedicina, entre otros.

Esta constelación de satélite LEO no usará enlaces intersatelitales, ni procesamiento a bordo, lo que hace la tecnología un poco más sencilla y convencional, reduciendo sus tiempos de implementación y sus costos.

Teledesic es una red de satélites en órbita baja, que ofrecerá servicios de banda ancha: "Internet en el Cielo", a cualquier punto en el planeta [29]. Inicialmente. la constelación de satélites estará formada por 288 satélites, divididos en 12 planos, cada uno con 24 satélites en banda Ka. Teledesic solicitó a la FCC un "suplemento" en banda Ku (KuBS) para su sistema, el cual estará formado por 30 satélites más, divididos en 6 planos a una altitud d 10320 km, ofreciendo servicios tanto fijos como móviles.

Tabla 5.1. Sistemas propuestos no geostacionarios en banda Ku

COMPAÑÍA	SISTEMA	PLANOS ORBITALES	SATÉLITES POR PLANO	ALTITUD ORBITAL [km]	INCLINACIÓN	COBERTURA	ISL	CONMUTACIÓN A BORDO
Alcatel Alsthom	SkyBridge	20	4	1469	53°	±70°	Ninguno	Ninguna
Boeing	NGSO FSS en banda Ku	4	5	20182	57°	Global	Ninguno	Gateway de conmutación de paquetes al usuario SSTDMA Gateway de usuario
Hughes	HughesLINK	10	7	15000	45°	Global	Óptico	SSTDMA y Conmutación de Paquetes
Hughes	HughesNET	10	7	1490	54.5°	±75°	Óptico	SSTDMA y Conmutación de Paquetes
Teldecslc	KuBS	6	5	10320	70°	+18 a +90° -18 a -90°	Óptico	Conmutación de paquetes
Virtual Geosatellite LLC	Virgo	15	1	27300 (apogeo), 0.66 Excent	63.4°	9 áreas de servicio regionales	Óptico	Ninguna

5.3. SISTEMAS EN BANDA KA

La FCC abrió dos periodos en los que se recibieron solicitudes para el desarrollo de sistemas en banda Ka. El primer periodo recibió catorce propuestas, de las cuales destacan Astrolink y Teledesic. En el segundo periodo se propuso Celestri, por Motorola, la cual ha sido cancelada, y algunas otras como @Contact o segundas fases de sistemas como Astrolink o Skybridge. En la tabla 5.2 se muestra un resumen de los sistemas propuestos, tanto en su primera etapa como en la segunda.

Astrolink, propuesta por Lockheed Martin, será una constelación de 9 satélites geoestacionarios en cinco posiciones orbitales, ya que colocará 2 satélites en 4 de sus posiciones, operando con polarización ortogonal, como se muestra en la figura 5.1. Astrolink ofrecerá servicios de Internet global, videoconferencia, telemedicina, banda ancha por demanda, entre otros. Además, tendrá enlaces intersatelitales entre sus satélites a 60 GHz con una capacidad de 1 Gbps.

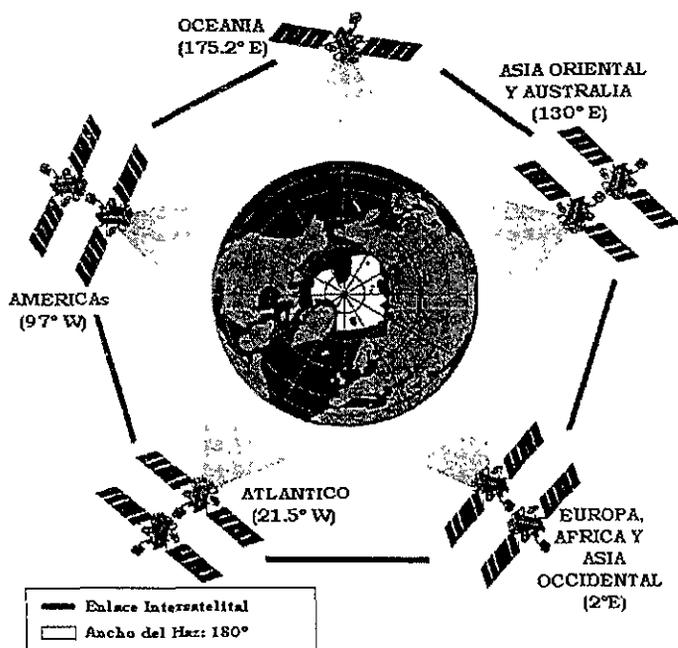


Figura 5.1. Constelación Astrolink

Otro sistema propuesto fue Spaceway, por Hughes, el cual siguiendo un esquema parecido al de Astrolink, tendrá 21 satélites en 16 posiciones geo-orbitales y pretende manejar enlaces intersatelitales a 60 GHz y a 1 Gbps.

En la segunda fase de la entrega de propuestas estuvo Celestri, un sistema propuesto por Motorola, cuyo antecesor fue un llamado sistema "Millenium" y un sistema en banda Q/V, M-Star. Celestri pretendía ser la conjunción de ambos sistemas, y que ofrecería a sus usuarios servicios de alta velocidad, siendo así un competidor de Teledesic. Finalmente, Motorola se unió a este último, para desarrollar y construir la constelación Teledesic. Esta constelación originalmente consistía de 840 satélites en órbita baja, y que debido al presupuesto y complejidad del proyecto, se redujo a 288 satélites, comunicado con enlaces entre satélites que forman una red robusta, combinando las ventajas de una red conmutada por circuitos y por paquetes.

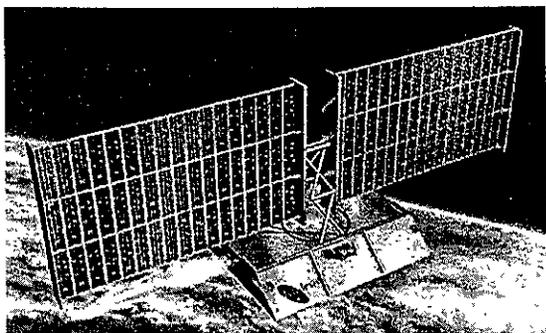


Figura 5.2. Satélite Teledesic

Tabla 5.2. Sistemas propuestos en banda Ka

COMPAÑÍA	SISTEMA	ÓRBITA	COBERTURA	SATÉLITES	ISL	CONMUTACIÓN A BORDO
Lockheed Martin Corp.	Astrolink	GEO	Global	9	si	FPS
Loral	Cyberstar	GEO	Global Limitada	3	si	BBS
Echostar Corp.	Echostar	GEO	EUA	2	si	BBS
Hughes Comm Inc.	Galaxy/Spaceway	GEO	Global	20	si	BBS
GE Americom	GE*Star	GEO	Global Limitada	9	Ninguno	Ninguna
KaStar Satellite Comm.	KaStar	GEO	EUA	2	si	FPS
Motorola	Millenium	GEO	EUA / America	4	si	FPS
Morning Star Satellite Co. LLC	Morning Star	GEO	Global Limitada	4	Ninguno	Ninguna
NetSat 28 Co. LLC	NetStat 28	GEO	CONUS	1	Ninguno	Conmutación óptica
Orion Co.	Orion	GEO	EUA/IOR	3	TBD	FPS
PanAmSat Corp.	PanAmSat	GEO	AOR	2	Ninguno	Ninguna
Teledesic	Teledesic	LEO	Global	840	si	FPS
Vision Star Inc.	VisionStar	GEO	CONUS	1	Ninguno	Ninguna
AT&T	VoiceSpan	GEO	Global Limitada	12	si	FPS
@Contact LLC	--	ICO	±65°	16	Radio (4)	ATM BBS
Direct Com Networks Inc.	--	GEO	CONUS	2	Radio	MSM y Banda Base
Hughes Comm Inc.	SE	GEO	Global Limitada	8	Óptico (min 3)	MSM
Hughes Comm Inc.	SNGSO	ICO	±80°	20	Óptico (4)	MSM y Banda Base
Lockheed Martin Corp.	Astrolink Phase II	GEO	Global	5	Radio (3)	ATM BBS
Lockheed Martin Corp.	LM-MEO	ICO	Global	32	Óptico	BBS
Motorola	Celestri	LEO	±60°	63	Óptico (6)	FPS
PanAmSat Corp.	--	GEO	Global Limitada	6	Radio	MSM
SkyBridge	SkyBridge II	LEO	±70°	96	Óptico (4)	BBS y Bent-Pipe

5.4. SISTEMAS EN BANDA Q/V

Las frecuencias propuestas por la FCC para los servicios en banda Q/V son las que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 5.3. Frecuencias de la banda Q/V

	Enlace de Bajada [GHz]	Enlace de Subida [GHz]
Geoestacionario	37.5-40.5	47.2-50.2
No Geoestacionario	37.5-48.5	48.2-49.2

Entre los nuevos sistemas propuestos figuran proyectos de Hughes, de Lockheed Martin, M-Star de Motorola, así como un suplemento de Teledesic.

El proyecto de Teledesic en banda V (VBS²⁷), consistirá en una constelación de 72 satélites LEO a 1375 km de altura, cuyo objetivo será aliviar el tráfico en banda Ka en ciertas áreas, y se espera que tenga enlaces intersatelitales ópticos para el ruteo del tráfico.

En la tabla 5.4 se enlistan los sistemas planteados en banda Q/V.

²⁷ VBS V Band Supplement

Tabla 5.4. Sistemas propuestos en banda Q/V

COMPAÑÍA	SISTEMA	ÓRBITA	SATÉLITES	COBERTURA	ISL	CONMUTACIÓN A BORDO
Denali Telecom. LLC	Pentriad	Molniya	9	25°N a 85°N	Ninguno	MSM
GE Americom	GE*Star Plus	GEO	11	Global	Óptico (¿2?)	MSM
Globalstar L.P.	GS-40	LEO	80	±70°	Ninguno	MSM
Hughes Comm. Inc.	Expressway	GEO	14	Global Limitada	Óptico	SSTDMA
Hughes Comm. Inc.	SpaceCast	GEO	6	Global Limitada	Óptico	SSTDMA
Hughes Comm. Inc.	StarLynx	GEO y MEO	4 y 20	±80°	Óptico (2 y 5)	BBS
Lockheed Martin Corp.	Q/V Band	GEO	9	Global	Radio (2) Óptico (3)	ATM BBS
Loral Space & Commun. Ltd	Cyberpath	GEO	10	Global	Radio (2)	ATM BBS
Motorola	M-Star	LEO	72	±60°	Radio (¿2?)	MSM y SSTDMA
Orbital Sciences Corp.	Orblink	MEO	7	±50°	Radio (2)	MSM
PanAmSat	VStream	GEO	12	Global	Radio (¿2?)	MSM
Spectrum Astro Inc.	Aster	GEO	25	Global	Óptico (2)	SSTDMA y BBS
Teledesic	VBS	LEO	72	Global	Óptico (4)	BBS
TRW	GESN	GEO y MEO	14 y 15	±70°	Óptico (10 y 4)	BBS90

6. CONCLUSIONES

El desarrollo de la tecnología en estas últimas décadas, así como las necesidades de los seres humanos en cuestión de comunicaciones cada vez mayores y de diferentes tipos, más rápidas y de calidad, pero sobre todo, comunicaciones en cualquier momento y principalmente lugar, en cualquier punto de la superficie terrestre y hasta en el espacio, ha hecho que el mercado satelital crezca y se siga desarrollando, en paralelo con otras tecnologías de cable.

Así, hemos visto como en pocos años se han probado y comercializado sistemas de constelaciones en diferentes órbitas a la órbita común y más saturada actualmente, como es la órbita geostacionaria. Ejemplos de esto son Iridio y Globalstar, constelaciones de satélites que ofrecen servicios de telefonía móvil a nivel global y que tienen ciertas decenas de satélites girando alrededor de la tierra.

Iridio, un sistema que en su inicio resultó un reto, pues sería el primer sistema comercial que incluyera enlaces intersatelitales, tuvo muchos contratiempos para iniciar. Finalmente, empezó a operar y poco tiempo después la compañía se fue a la quiebra, y no precisamente por su tecnología, sino por el nicho de mercado que quería ofrecer. Afortunadamente, Iridio fue rescatada y volvió a dar servicio, esta vez a otro tipo de mercado: la Secretaría de Defensa de los Estados Unidos.

El proyecto Artemis, de la Agencia Espacial Europea, es un proyecto muy ambicioso, que por su complejidad y por ser experimental, ha tardado tanto tiempo en iniciar. Actualmente el satélite Artemis se encuentra en el espacio, pero en una órbita errónea, por lo que hay que esperar todavía a mediados del próximo año para poner a prueba su carga óptica y su enlace interorbital en banda Ka.

Es muy seguro que en un futuro el desarrollo de este tipo de tecnología intersatelital, ya sea óptica o en otras bandas, como la Ka o la U, se logre completamente, con la construcción de mejores transmisores, receptores y mejoras en las técnicas de ruteo y acceso. Los enlaces intersatelitales tienen grandes ventajas, principalmente porque evita conectar dos satélites haciendo un “doble salto” o regresando a la Tierra, ahorrando así tiempo, y dinero en estaciones base terrenas.

También vemos que el uso de enlaces ópticos tiene mayor mérito contra los enlaces intersatelitales de radiofrecuencia, pues tienen un mayor ancho de banda y sus terminales transmisor y receptor son mucho más pequeñas y dan por resultado satélites con mayor capacidad pero más pequeños. Asimismo los enlaces intersatelitales tienen efectos nulos de la atmósfera terrestre, uno de los mayores enemigos de los enlaces satélite-estación terrena.

La tecnología se está desarrollando, y se busca mejorar principalmente las fuentes de este tipo de desarrollo, como láseres, detectores, antenas para bandas de frecuencia más altas, etc.

En unos cuantos años, tendremos un mercado satelital bastante fuerte, con varias opciones de comunicación de gran calidad y velocidad, con varios y diferentes tipos de satélites en el espacio

De igual forma, se desarrollarán proyectos principalmente de enlaces ópticos de satélites a estaciones espaciales, lo que dará un gran avance a la carrera espacial.

7. REFERENCIAS

- [1] Neri. R., "Constelaciones de satélites en órbitas bajas e intermedias para el servicio móvil mundial". Ciencia y Desarrollo. Vol. XXIV, No. 141. Julio/Agosto 1998. SEP-CONACYT.
- [2] Clarke, Arthur C. "Extraterrestrial Data Relays". 1945
- [3] SaVi. Satellite Visualization Project
<http://www.geom.umn.edu/~worfolk/SaVi/constellations.html>
- [4] Notas de Prensa, ICO-Teledesic Global
<http://www.teledesic.com/about/newicofacts.htm>
- [5] Recomendaciones de la UIT:
ITU-R F.1249 Maximum equivalent isotropically radiated power of transmitting stations in the fixed service operating in the frequency band 25.25-27.5 GHz shared with the inter-satellite service.
ITU-R S.1151 Sharing between the inter-satellite service involving geostationary satellites in the fixed satellite service and the radionavigation service at 33 GHz.
ITU-R S.1326 Feasibility of sharing between the inter-satellite service and the fixed-satellite service in the frequency band 50.4-51.4 GHz
ITU-R S.1327 Requirements and suitable bands for operation of the inter-satellite service within the range 50.2-71 GHz
ITU-R S.1339 Feasibility of sharing between spaceborne passive sensors of the earth exploration-satellite service and inter-satellite links of geostationary-satellite networks in the range 50 to 65 GHz.
ITU-R SA.1278 Feasibility of sharing between the earth exploration-satellite service (space-to-earth) and the fixed, intersatellite, and mobile services in the band 25.5-27.0 GHz
ITU-R SA.1279 Spectrum sharing between spaceborne passive sensors and inter-satellite links in the range 50.2-59.3 GHz

- [6] Tirro, Sebastiano, "Satellite Communication System Design". Plenum Press, Nueva York, 1993
- [7] An Introduction to the Iridium System
Richard Hobby
The Institute of Electrical Engineers
Londres, 1998.
- [8] Transcript of a conference call regarding Iridium Satellite LLC
<http://www.saveiridium.org/>.
December 12, 2000/9:00 a.m. CST
- [9] Iridium Aeronautical Satellite Communications
Lemme, Peter W., Glenister, Simon M, Miller, Alan W. IEEE, 1998
- [10] Link Strategy for the mobile Satellite System Iridium
Keller, Harald; Salzwedel, Horst. IEEE, 1996
- [11] COM DEV International, Press Releases.
<http://www.comdev.ca>
- [12] An Operational and Performance Overview of the Iridium Low Earth Orbit Satellite System.
Pratt, Stephen, Raines, Richard, Fossa Jr., Carl, y Temple, Michael.
IEEE Communications Surveys. Segundo trimestre de 1999.
- [13] Press Release N°44-2001 - Artemis recovery operation continuing successfully
ESA Media Relation, Paris, 25 de Julio de 2001
- [14] The Envisat Mission and System.
J. Louet.
ESA Bulletin, No. 106, Junio 2001.
- [15] The Envisat Satellite and its integration.
Dubock, P.A., Spoto, F., Simpson J., Spencer D., Schutte E. Y Sontag H.

ESA Bulletin, No. 106, Junio 2001.

- [16] First Satellite Crosslink Marks: New Era in Space Communications.
News Release, Office of Assistant Secretary of Defense, Washington, D.C.
http://www.defenselink.mil/news/Dec1995/b121995_bt668-95.html
- [17] Milstar Fact Sheet. Air Force Space Command.
<http://www.spacecom.af.mil/hqafspc/library/facts/milstar.html>
- [18] Principles of Communication Satellites
Gordon, Gary D., Morgan, Walter L., John Wiley & Sons, Inc., Estados Unidos de América, 1993.
- [19] Hecht, Jeff. The Laser Guidebook. McGraw Hill, 2ª Edición. Estados Unidos de América, 1992.
- [20] Kuhn, Kelvin J. Laser Engineering. Prentice Hall. Estados Unidos de América, 1998.
- [21] Comparison of Optical Technologies for Intersatellite Links in a Global Telecommunications Network
- [22] Optical Communications
Matra Marconi Space
<http://www.matra-marconi-space/english/protocuk/optcom/optcom.htm>
- [23] The ARTEMIS programme
Dickinson A.; Oppenhäuser G., Sandberg, J., et al., ESA Bulletin No 91. Agosto 1997
- [24] ARTEMIS
Alenia Aerospazio, Space Division.
<http://www.alespazio.it/artemis/artemis.htm>
- [25] PASTEL, SPOT-4 launch
http://spot4.cnes.fr/spot4_gb/pastel.htm
- [26] The SILEX optical interorbit link experiment

G.D. Fletcher, T.R. Hicks y B. Laurent, Electronics & Communication Engineering Journal, December 1991, IEE

[27] SILEX: The First European Optical Communication Terminal in Orbit.

T. Tolker-Nielsen, J.C. Guillen., ESA Bulletin, Noviembre 1998.

[28] The U.S. Filings for Multimedia Satellites: A review

Evans, J.V., International Journal of Satellite Communications, No. 18: Pág. 121-160, John Wiley and Sons, 2000.

[29] Teledesic: Technology Overview

<http://www.teledesic.com/tech/tech.htm>

[30] Panel Report on Global Satellite Communications Technology and Systems.

Pelton, Joseph N., Mac Rae, Alfred U., et.al., International Technology Research Institute, World Technology Division. Diciembre de 1998.

<http://itri.lovola.edu/satcom2/toc.htm>