

ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL SUBSISTEMA DE TELEMETRÍA, TELECOMANDO Y SEGUIMIENTO, PARA LA UBICACIÓN Y ESTADO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA SATELITAL.

Ing. Carlos Alberto Zerpa
e-mail: czerpa@abae.gob.ve

RESUMEN: *Este artículo trata sobre la estructura general del subsistema de telemetría, telecomando y seguimiento; describiendo el funcionamiento de las estaciones terrenas satelitales y de sus componentes, con el fin de conocer su empleo durante la operación en órbita del sistema satelital. Las funciones principales ejecutadas por una estación terrena, en apoyo a un satélite operacional, involucran funciones de alta complejidad que usualmente abarcan las siguientes tareas: Seguimiento, Telemetría y Comando, los cuales se usan; para determinar la posición del satélite en su órbita; adquirir y registrar datos y status del satélite, e interrogar y controlar las diversas funciones del satélite. Además de ello realiza operaciones de control para determinar parámetros orbitales, programar todas las pasadas del satélite y monitorear los computadores a bordo.*

PALABRAS CLAVE: Estación terrena, satélite, seguimiento, telecomando, telemetría.

1 INTRODUCCIÓN

Dada la importancia de conocer a precisión el estado y ubicación del satélite, reside en el buen funcionamiento y rendimiento de los equipos a bordo del mismo. El Subsistema de Telemetría, Telecomando y Seguimiento, es imprescindible para la operación exitosa de un satélite, tiene como misión principal validar y garantizar la intercomunicación entre sistemas que lo integran, con el respaldo de los equipos de prueba que lo componen y sus software, es por ello que la tarea de la telemetría es recoger todos los datos que modulan los equipos receptores en tierra, a través de enlaces de microondas. Por su parte los telecomando son para transmitir la instrucción directa al satélite, incluyendo órdenes de operación, datos para el control de la operación y nuevos programas de ejecución del satélite. El rastreo está definido por el uso de señales inalámbricas de enlace ascendente y enlace descendente para medir velocidad, distancia y dirección del satélite con respecto a la tierra; y por eso, podemos confirmar la ubicación y la información de la órbita del mismo.

La importancia del subsistema de telemetría, telecomando y seguimiento se basa principalmente en la necesidad de conocer si se están desarrollando correctamente las funciones de los equipos a bordo del satélite.

Una estación terrena satelital debe tener la capacidad de realizar todas las funciones que permitan al operador como conocer en todo momento la posición y el estado de funcionamiento de cada sistema a bordo del satélite, también es necesario que esta sea capaz de comandar los sistemas y cargas útiles.

La interconectividad de los enlaces debe garantizar en tiempo real la operatividad y rendimientos de los datos de telecomando (TC) y telemetría (TM) enviados y recibidos en las estaciones terrenas, permitiendo conocer la ubicación exacta mediante el rastreo/seguimiento. Es importante tener en cuenta algunos factores significativos para la ubicación del sitio de una estación terrena que garantice la calidad de un enlace satelital, entre ellos lo geográfico; un estudio de la zona geográfica donde se aborde temas como clima, condiciones sísmicas, entre otros.

2. LA COMUNICACIÓN SATELITAL

La comunicación satelital es un medio no guiado de comunicaciones inalámbricas, tanto para su transmisión como su recepción de señales a través de antenas. Este sistema de comunicación los conforman tres componentes, entre ellos, la estación terrena central (transmisora), la estación remota (receptora) y el satélite [1]. A este conjunto se le denomina modelo de enlace, el cual tiene como objetivo comunicar ambas estaciones tanto la transmisora como la receptora, utilizando el satélite como repetidor activo de señal en el espacio. Durante la transmisión la antena emite energía electromagnética en el medio; es el enlace ascendente, en el caso de la estación terrena central, envía la señal de la información (tráfico de comunicaciones y/o datos) solicitada por la estación remota, es decir, es el enlace que mantiene informada a la estación central de su estado actual en tiempo real a través de la red.

Ahora bien en la recepción, la antena capta las ondas electromagnéticas del medio que la rodea; es el enlace descendente, en el caso de la estación terrena central, recibir la información enviada por la estación remota, para observar su estado de operación en tiempo real; en el caso de la estación remota es el enlace que permite recibir la información que envía la estación central. Estas transmisiones inalámbricas pueden ser direccionales u omnidireccionales.

De tal manera tenemos que un satélite, se define como un repetidor radioeléctrico puesto en órbita alrededor de la Tierra con gran variedad de fines,

científicos, tecnológicos y militares. Los satélites artificiales son naves espaciales automáticas, fabricadas en la tierra y enviadas en vehículos de lanzamiento [2], al espacio exterior. Estos reciben señales generadas en la tierra, las amplifica y las vuelve enviar a la tierra, ya sea al mismo punto de origen. Estas son recibidas en una banda de frecuencia a través del canal ascendente de las estaciones de transmisión para posteriormente procesarlas, convertirlas y finalmente transmitir las en otra banda de frecuencia a través del canal descendente a las estaciones receptoras. Estas bandas de operación dependen de la misión del satélite, pudiendo ser S, C, Ku, Ka, entre otras. En la tabla 1, se muestra los diferentes rangos de frecuencias usados para un sistema satelital [3].

Tabla 1. Bandas de sistemas satelitales [3].

Banda	Rango de frecuencias
Banda L	1 a 2 GHz
Banda S	2 a 4 GHz
Banda C	4 a 8 GHz
Banda X	8 a 12 GHz
Banda Ku	12 a 18 GHz
Banda K	18 a 27 GHz
Banda Ka	27 a 40 GHz
Banda V	40 a 75 GHz

Finalmente tenemos que estos artefactos de comunicaciones son un medio muy apto para emitir señales de radiocomunicación en zonas muy amplias y/o poco desarrolladas, ya que pueden utilizarse como enormes antenas suspendidas en el espacio. Dado que no hay problema de visión directa, se suelen utilizar frecuencias elevadas en el rango de los GHz, que son más inmunes a las interferencias; además, la elevada direccionalidad de las ondas a estas frecuencias permite enfocar zonas concretas de la Tierra.

2.1. ANTENAS

Desde hace más de tres siglos, en sus inicios a través de extensos experimentos y teorías relacionadas con la innovación de estas herramientas de comunicación. Las antenas han evolucionado de manera muy significativa hasta la actualidad, sirviendo a la población mundial; interconectando a cada usuario en el mundo sin precedentes de cobertura, fiabilidad y rendimiento. Estos equipos son el componente principal de una estación terrena, cuyas funciones de soporte pueden incluir el seguimiento, la telemetría y los telecomandos, además de la capacidad de voz y televisión.

Las antenas de un satélite son los elementos que le permiten la radiación de la energía al espacio o la recepción de la energía desde éste [4]. Por el principio de reciprocidad, una antena transmisora puede ser también una antena receptora y constituyen un sistema muy complejo que producen haces de radiación que pueden conformar las áreas sobre la superficie de la tierra a la cual van a servir los satélites. Hay varios tipos básicos de antenas usadas en un satélite, con distintos

tamaños, configuraciones y acabados según las frecuencias a las que tengan que operar y a la cobertura, entre ellas tenemos: las monopolos, dipolos, helicoidales biconicas, bocinas o cornetas, antenas reflectoras [4]. Existen también los elementos de alimentación, llamados alimentadores, que se usan en antenas reflectoras y que generalmente son bocinas conectadas a guías de onda que emiten (de los amplificadores de potencia) energía hacia un reflector parabólico o reciben (para entregárselas a los receptores).

Las antenas de alambre (monopolos, dipolos) básicamente se usan a frecuencias de VHF y UHF para proveer comunicación a los sistemas de TT&C. Ellas dan una cobertura omnidireccional. Por su parte las de tipo bocinas o cornetas se usan a frecuencias de microondas donde se requiera dar una cobertura global por su haz de radiación bastante ancho. También se usan como alimentadores para las antenas reflectoras, solas o en grupo.

Las antenas reflectoras se iluminan usualmente con una o más bocinas para tener una gran apertura la cual se puede lograr con una sola bocina. Las estaciones terrenas utilizan el paraboloide como la forma básica para la mayoría de las antenas reflectoras; las antenas satelitales muchas veces modifican el perfil del reflector paraboloidal para conformar el patrón de radiación para irradiar una zona de cobertura en particular.

2.2. TIPOS DE ENLACES SATELITALES

El satélite debe utilizar una frecuencia diferente para la retransmisión en el enlace descendente; de otra manera, una señal descendente de gran potencia podría interferir la débil señal del enlace ascendente.

Un vínculo entre tierra – espacio está dado por las siguientes características [5]:

- Un enlace tierra - satélite también conocido como enlace ascendente (Uplink): se define como el trayecto de la señal que sale desde una estación terrestre al satélite.
- Un enlace satélite - tierra también conocido como enlace descendente (Downlink): se refiere como el trayecto de la señal desde el satélite hacia la tierra.

3. ESTACIONES TERRENAS

Las estaciones terrenas satelitales están dadas por un conjunto de equipos de comunicaciones y de cómputo, software de control, interconectados entre sí con una o un conjunto de antenas, cuyo objetivo es permitir una comunicación directa con un satélite para la Tx/Rx señales. Estas estaciones realizan funciones que permiten al operador conocer el estado y rendimiento del satélite a través de la entrada y salida de las señales de comunicación en frecuencia intermedia; mediante la modulación, demodulación, conversión de frecuencias,

codificación, etc. Las señales que originalmente llegan a la estación terrena en banda base, pasan a un modulador, posteriormente pasan a un convertidor el cual se encarga de elevar la frecuencia de las señales anteriores a una frecuencia de subida en el orden de los GHz, de ahí las señales pasan a un amplificador de alta potencia encargado de elevar el voltaje y la corriente a los niveles requeridos para su transmisión, pasando de aquí a un diplexor encargado de separar las señales, hasta que finalmente serán llevadas a la antena para ser radiadas al satélite. El tamaño y complejidad de una estación terrena depende del servicio que será provisto y la potencia radiada por el satélite, las estaciones más simples permiten solo la recepción y están equipadas con una antena parabólica que puede tener un diámetro de menos de un (01) metro, las antenas más antiguas y construidas por Intelsat llegaron a tener treinta y dos (32) metros de diámetro.

La estación terrena transmisora se caracteriza por la potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE). Esto se relaciona a la potencia del transmisor y la ganancia de la antena en la frecuencia de transmisión. Por su parte la estación terrena receptora está dada por una figura de mérito (G/T) y la Frecuencia Intermedia (IF) de banda ancha.

Un modelo de la estación terrena se presenta en la figura 1.

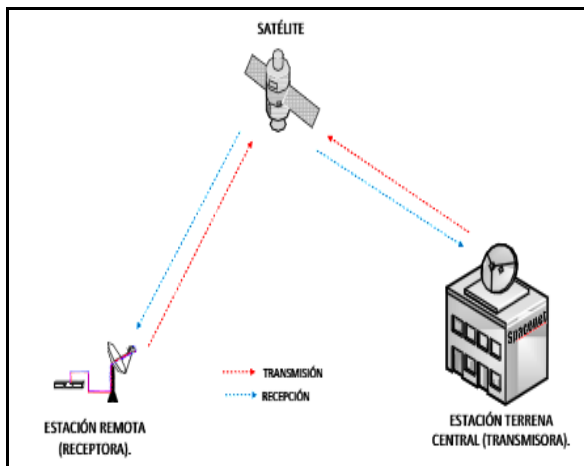


Figura 1. Modelo de una estación terrena satelital [1].

De tal manera que una estación terrena que está bajo la cobertura de un satélite le envía una señal de microondas, denominada enlace ascendente; cuando la recibe, el transpondedor del satélite (el cual es un aparato emisor-receptor), simplemente la retransmite a una frecuencia más baja para que la capture otra estación en tierra.

Características de una estación Terrena Satelital:

- La técnica de modulación determina la eficacia del ancho de banda (bits/Hz).

- El modulador debe incluir un filtro (modelador).
- Las técnicas de modulación pueden determinar también el umbral de la recepción.
- El conversor ascendente es parte del RFT (Terminal de Radio Frecuencia).

4. DIAGRAMA DE BLOQUE DE UNA ESTACION TERRENA

En un satélite, un transpondedor recibe la señal, la amplifica, cambia su frecuencia y retransmite la señal. Todas las terminales terrenas satelitales en la línea de vista del satélite tienen la capacidad de comunicarse con él. [5]. A continuación se explican cada uno de los bloques que integran una estación terrena en la figura 2.

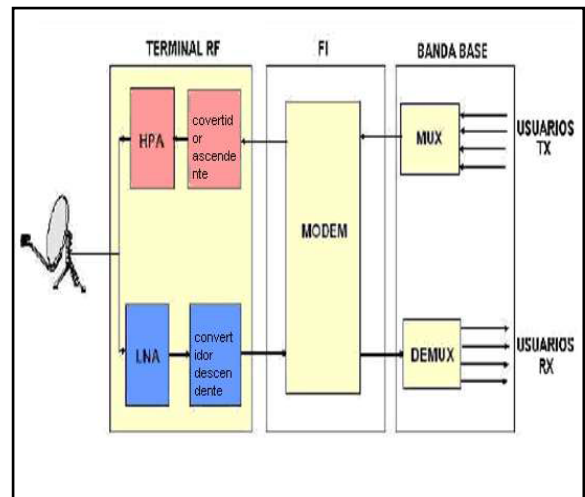


Figura 2. Diagrama de bloques de una estación terrena [5].

4.1. EQUIPO DE BANDA BASE

Banda Base es el término utilizado para el dispositivo que ensambla y desensambla data para el enlace de subida y bajada [5]. En el enlace de subida la información y tráfico es codificado y modulado. En el enlace de bajada es demodulada y decodificada.

Este dispositivo proporciona la transferencia de información de dos vías entre el satélite y el centro de control de satélite (SCC) a través de los equipos de RF. Realiza tres funciones básicas:

- La función de telemetría es la recepción, demodulación de tramas de telemetría del satélite, y transmisión de tramas a la centro de control del satélite.
- La función de telecomando es la recepción de tramas de telecomando de SCC, verificación, y transmisión de tramas de telecomando al

satélite. Las tramas de telecomando pueden ser criptografías.

- La función de seguimiento es la recepción de requerimientos de distancia del centro de control del satélite, generación y transmisión al satélite de los tonos requeridos; y recepción, medida, y transmisión al centro de control del satélite del desplazamiento de fase entre los tonos transmitidos y recibidos.

Durante la operación del equipo de banda base de una estación terrestre satelital interactúa con los equipos de RF a 70MHz.

- Los equipos de banda base con redundancia de 1:1 pueden actuar simultáneamente con dos señales de telemetría.
- El equipo de banda base pueden recibir tramas de telecomando desde el centro de control del satélite o generar códigos de telecomando desde un teclado que actúa como respaldo.
- La unidad de medición de distancia mide la diferencia de fase entre los tonos de distancia transmitidas y recibidas, posteriormente envía el resultado al centro de control del satélite.

Por su parte la unidad de telemetría tiene las siguientes funciones:

- Recibir y demodular las señales de 48KHz de los receptores en IF, con el propósito de extraer los mensajes de Telemetría en PCM-PSK.
- Generar una señal NRZ-L (desde PCM-NRZS) y su reloj asociado.
- Usar esta señal NRZ-L para reconstruir las tramas de telemetría producidas a bordo del satélite.

La Unidad de determinación de distancia o seguimiento, tiene las siguientes funciones:

- Generar tonos para determinación de distancia, enviarlos, modularlos y sincronizarlos en orden.
- Recibir y enviar mediciones de variación de fase.
- Resolver ambigüedades de fase, computar el rango, y enviar la distancia y fase alternativas.
- Acoplar los tonos de distancia y realizar calibración de errores.

4.2 EQUIPO DE FRECUENCIA INTERMEDIA

Esta interfaz modula el flujo de bits transmitidos en una portadora de frecuencia intermedia. Demodula la señal recibida. Provee la detección y corrección de errores.

4.3 EQUIPO DE RADIO FRECUENCIA

Es el subsistema que está conformado por los equipos de la estación terrena encargados de realizar la conversión de la frecuencia intermedia (IF) a radio frecuencia y de la amplificación de las señales de radio frecuencia para el enlace ascendente en la transmisión. En la recepción amplifica y convierte las señales de radio frecuencia proveniente del enlace descendente del satélite a IF. Todas estas funciones con el objetivo de transmitir y recibir las señales de Seguimiento, Telecomando y Telemetría, así como también las señales que se emplean para las pruebas en órbita del satélite y de los transpondedores.

5. EQUIPOS DE PRUEBAS ESPECIALES DEL SUBSISTEMA DE TELEMETRÍA, TELECOMANDO Y SEGUIMIENTO. TT&C SCOE

Durante el proceso de ensamblaje de un satélite artificial, el subsistema de TT&C, tiene la misión de verificar a través de sus equipos de pruebas que lo conforma, los cuales permiten dar un diagnóstico general durante la integración de su diseño. Todo ello para luego aprobar la operación de puesta en órbita.

Un modelo del sistema y los equipos especiales de prueba en conjunto con el subsistema de OBDDH&TCSS; se muestra en la figura 3.

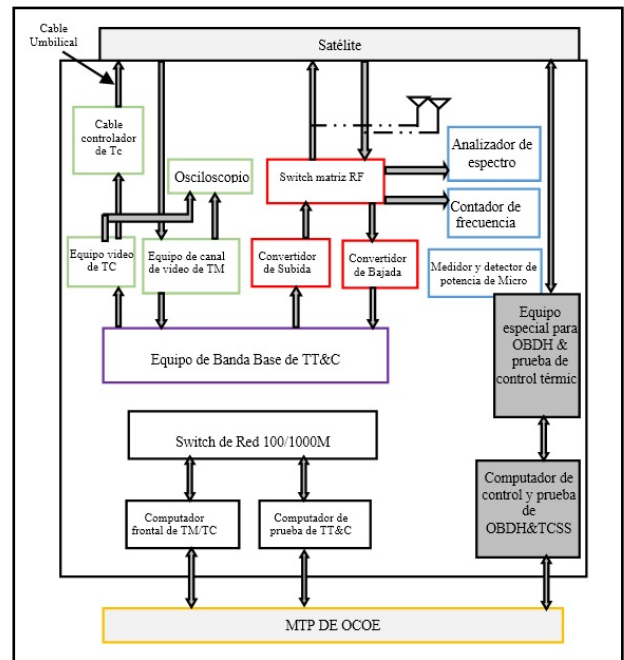


Figura 3 Modelo del sistema de pruebas de TTC&OBDDH&TCSS.

6. ESTRUCTURA DEL SUBSISTEMA DE TT&C.

Los equipos de pruebas especiales del subsistema de Telemetría, Telecomando y Seguimiento en tierra, está conformado por un dispositivo de banda base, un dispositivo de canal de video de TM/TC, un monitor de osciloscopio, dispositivos de conducción de radio frecuencia en diferentes banda de operación, los instrumentos para la prueba de rendimiento de radio frecuencia como lo son el analizador de espectro, el contador de frecuencia de microondas, el medidor de potencia de microondas y un generador de señales, un conmutador de red, una computador de TM/TC, el cable umbilical y los equipos OBDH&TCSS SCOE.

Los equipos de prueba en tierra del subsistema de TT&C están destinados a la verificación del satélite. Estos no sólo completan el control, medición, recopilación y procesamiento de datos e información, sino que también cumplen la función de simular y estimular al satélite durante las pruebas. Estas se realizan para comprobar las funciones del satélite y el rendimiento de la interfaz eléctrica en las condiciones de suministro de energía, después que los equipos a bordo estén integrados en el satélite. En la prueba, el satélite es controlado y estimulado por el enlace ascendente. La recopilación de datos y el procesamiento de los equipos a bordo se implementan a través del enlace descendente. Sus funciones son:

- La demodulación de la señal de telemetría, la sincronización de bits, sincronización de trama y la encapsulación de los datos.
- El envío de comandos, modulación y chequeo de los telecomando.
- La generación de tonos de rastreo y modulación a través del enlace ascendente. La recepción de los tonos de rastreo.
- El aislamiento de la señal de vídeo de TM/TC, adaptación de impedancia y conmutación de los canales a través del enlace ascendente y descendente.
- La conversión de frecuencia de la portadora. Establecimiento de enlace RF para la prueba por satélite.
- La prueba de rendimiento del subsistema TT&C, incluye la prueba de funcionamiento del sistema de comunicación entre subsistemas.

En el subsistema de TT&C se controla la órbita y orientación del satélite una vez puesto en marcha en el espacio, se monitorea el estado de todos los sensores y de los diferentes subsistemas del satélite, y se conmutan (encender o apagar) las diferentes secciones del sistema de comunicaciones.

En la figura 4, se muestra un diagrama representativo del funcionamiento del subsistema de telemetría, telecomando y seguimiento.

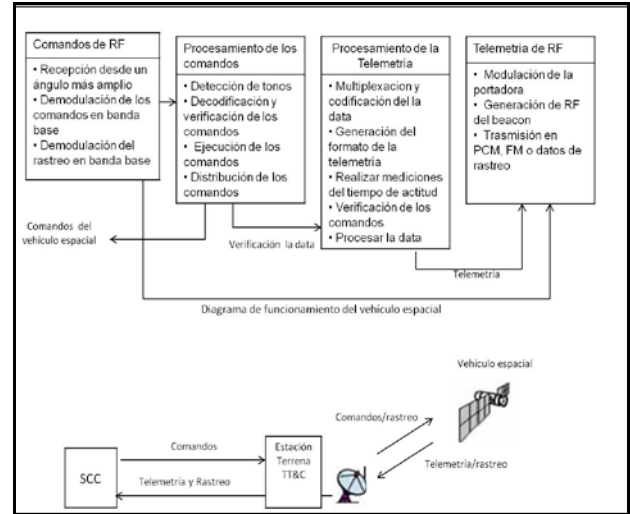


Figura 4. Diagrama funcional de un sistema de TT&C [6].

Este subsistema permite conocer a control remoto la operación y posición del satélite, así como enviarle órdenes para que algún cambio deseable se ejecute. El equipo de telemetría cuenta con diversos tipos de sensores instalados en varios cientos de puntos de prueba, que miden cantidades tales como voltajes, corrientes, presiones, potencia de salida de amplificadores, posición de interruptores y temperaturas.

Estos dispositivos durante las pruebas en la integración y ensamblaje de los equipos a bordo del satélite, deben cumplir con ciertos estándares internacionales que garanticen la fiabilidad de los resultados de las mismas. Que permitan seguir con el desarrollo de la realización de las actividades programadas para poner en órbita a un satélite, entre ellas se puede mencionar la Agencia Espacial Europea (ESA), la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA). Los parámetros de estos estándares dados por estas agencias internacionales se pueden mencionar valores de la data de la telemetría, formato de los telecomando, los rangos de frecuencias e incluso los requisitos de conexión a tierra, entre otros. Además de estos patrones de seguimiento que se deben manejar para la verificación del rendimiento de los dispositivos; se debe cumplir con las medidas de seguridad dictadas en cada lugar de prueba que se debe practicar dentro del establecimiento.

6.1 ETAPAS DE OPERACIÓN DEL SUBSISTEMA A BORDO DEL SATELITE

En órbita el rastreo se efectúa mediante la transmisión de varias señales piloto, denominadas tonos, desde la estación terrestre de control hacia el satélite [6]. Normalmente se utilizan de seis a siete tonos

distintos, cuya frecuencia es de unos cuantos kilohertz, y que modulan sucesivamente en fase a la señal portadora de la estación terrena de control; el satélite recupera los tonos y remodula con ellos a su propia portadora, para retransmitirlos hacia la Tierra, en donde son detectados por el centro de control. Las señales recibidas en Tierra se comparan en fase con las transmitidas originalmente, y las diferencias obtenidas permiten calcular la distancia a la que se encuentra el satélite, con precisión de unas cuantas decenas de metros. La transmisión de las señales de telemetría y la retransmisión de los tonos de rastreo hacia la Tierra se realiza a través de un mismo amplificador a bordo del satélite, al igual que con las señales de comando que se hayan recibido, para que se verifiquen antes de que sean ejecutadas. Toda la información de telemetría es digitalizada, multiplexada con TDM y enviada a la Tierra en formato PCM.

Los datos a transmitir pueden ser cantidades analógicas por ejemplo el resultado de una medida, palabras digitales por ejemplo el valor de un registro o estados binarios del sistema por ejemplo 0 o 1 para activar o desactivar la retransmisión. Las cantidades analógicas son medidas, cuantificadas y codificadas con un número de bits que dependerá de la resolución requerida y del margen dinámico de la señal.

Durante los varios años de vida operativa del satélite, el amplificador que se usa es el mismo de alguno de los transpondedores empleados para las comunicaciones en general, ya que las señales transmitidas y recibidas por el subsistema de TT&C ocupan muy poco ancho de banda y pueden compartir el mismo amplificador de banda C o Ku con otro tipo de señales.

Una de las características más importantes del enlace de comandos es la seguridad: es vital para la supervivencia del satélite que el comando ejecutado sea realmente el que se tiene que ejecutar. Entre las precauciones tomadas podemos destacar: códigos correctores, repetición para detección y verificación de posibles diferencias, ejecución en diferido, etc.... Con la ejecución en diferido el comando es detectado por el satélite, almacenado en memoria, retransmitido a tierra por telemetría para verificar la autenticidad y ejecutado si y sólo si se recibe la autenticación por el enlace de comandos.

Las señales de comando son las que permiten efectuar las correcciones en la operación y funcionamiento del satélite a control remoto, como cambiar la ganancia de los amplificadores, cerrar algún interruptor, conmutar de transpondedor, modificar la orientación de la estructura, o bien durante la colocación en órbita, extender los paneles solares, mover las antenas y encender el motor de apogeo [6]. Todas estas señales de comando van codificadas y cifradas por cuestiones obvias de seguridad, y la mayor parte de los sistemas que operan actualmente utilizan una secuencia en la que el satélite primero retransmite al centro de control los comandos que haya recibido, estos son verificados en Tierra, y si se comprueba que las

órdenes fueron recibidas correctamente, entonces el centro de control transmite la señal de ejecución. Al recibirla, el satélite procede entonces a efectuar los cambios ordenados.

7. CONCLUSIONES

Las comunicaciones satelitales brindan la capacidad de mantener la intercomunicación a nivel mundial de todos los habitantes del planeta, tanto así que por décadas han permitido su evolución tecnológica, facilitando diversas aplicaciones y herramientas que permiten conocer más de nuestro planeta, su origen y como ayudar para mejorar la calidad de vida.

Es determinante conocer las condiciones que permiten establecer la óptima operación de estos enlaces, es por ello que desde que se realice el diseño del sistema satelital hasta el momento de ponerse en órbita, se cumpla con los parámetros exigidos tanto en tierra como en el espacio para el buen funcionamiento del sistema satelital; ya que un enlace satelital se puede ver afectado por distintos factores que van degradando su calidad, tales como pérdidas ocasionadas por sus equipos de a bordo o las causadas por la naturaleza.

Por su parte las funciones ejecutadas por una estación terrena, en apoyo a un sistema satelital operacional abarcan las siguientes tareas de seguimiento para determinar su posición, telemetría para la adquisición de datos y el estatus del satélite, y, los telecomandos para interrogar y controlar las diversas funciones del satélite.

El subsistema de TT&C a bordo tiene como misión principal mantener comunicado los sistemas dentro del satélite, dando la facilidad de conocer el estado del mismo a las estaciones terrenas. Esto permite el correcto mantenimiento de los subsistemas del satélite. De allí la importancia que se tiene en mantener este enlace permanente para el acceso hasta en lugares no accesibles.

8. REFERENCIAS

- [1] T. I. J. Antonio y M. Oliver, "*Migración de una Estación Terrena (hub satelital) en Operación*", Mexico, 2013.
- [2] Wikipedia, "Satelite", [En línea]. Disponible: <http://www.wikipedia.org>. [Último acceso: 25 Junio 2014].
- [3] Teledesic, "Bandas de Frecuencias", [En línea]. Disponible: <http://www.upv.es/satelite/trabajos/pracGrupo17/frecuencias.html> [Último acceso: 22 Agosto 2014].
- [4] A. V. Miguel Fernando, "*Antenas*", 2008.
- [5] I. M. Galicia, "*Manual de instalación de Antenas para Internet Satelital*", Veracruz, 2010.
- [6] CONATEL- Ceditel, "*Manual de Comunicaciones Satelitales*", 2010.