

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA



COMUNICACION VIA
SATELITE

T E S I S

QUE EN OPCION AL TITULO DE
INGENIERO EN ELECTRONICA Y COMUNICACIONES

PRESENTA:

Juan Alfonso Castillo González

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE DE 1997

T

TK510

C377

1997

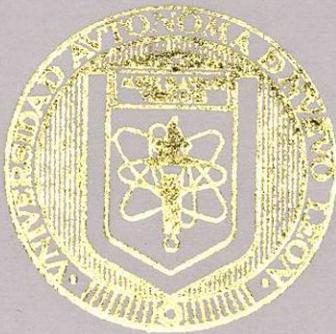
C.1



1080097065

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA



COMUNICACION VIA
SATELITE

T E S I S

QUE EN OPCION AL TITULO DE
INGENIERO EN ELECTRONICA Y COMUNICACIONES

PRESENTA:

Juan Alfonso Castillo González

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE DE 1997

+ K5104
C377
1997



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

COMUNICACIÓN VÍA SATÉLITE

TESIS

**QUE EN OPCIÓN A TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES
PRESENTA**

Juan Alfonso Castillo González

Monterrey, N. L.

Diciembre de 1997.

**INTRODUCCIÓN A LOS SATÉLITES
DE COMUNICACIONES**

CONTENIDO

Página

INTRODUCCIÓN.....	1
1. HISTORIA DE LOS SATÉLITES (LAS DIFERENTES ETAPAS).....	3
1.1 Ventajas de la comunicación vía satélite.....	7
1.2 Clasificación de los satélites.	8
2. LANZAMIENTO Y COLOCACIÓN DE ÓRBITA GEOSTACIONARIA.....	9
2.1 El cinturón Clarke.....	9
2.2 Como llegar a la órbita geostacionaria.	11
2.2.1. Inyección directa en órbita geostacionaria.	11
2.2.2. Inyección inicial en órbita elíptica.....	12
2.2.2. Inyección inicial en órbita circular baja.	12
2.3. El orbitador y la orbita Hohmann.....	13
2.4 Rescate de satélites.	17
3. EL SATELITE Y EL MEDIO AMBIENTE DEL ESPACIO.....	18
3.1 El satellite y su nuevo hogar.....	18
3.2 Las fuerzas perturbadoras.	21
3.3 La temperatura del satélite.	24
3.4 Otros factores de perturbación.	25
BIBLIOGRAFÍA.....	27

Satélites de Comunicaciones.

INTRODUCCIÓN.

Uno de los resultados más fascinantes y notables obtenidos a partir de los programas especiales es la tecnología de los satélites artificiales. La llegada de estos aparatos electrónicos complejos ha modificado visiblemente la forma de vida de la mayor parte de la población del mundo, y quizá de toda ella aunque sea en forma indirecta. Gracias a ellos conocemos con más precisión los recursos naturales de la Tierra y los fenómenos meteorológicos, las distancias entre las ciudades y los países se han acortado y ahora pueden intercambiar todo tipo de información casi instantáneamente, y más allá de las capas atmosféricas podemos observar y comprender mejor el universo.

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

Los satélites integran una gran familia, y parte de ella la constituyen los que están abocados específicamente a los servicios de comunicaciones; dentro de estos últimos, existen algunas variantes, pero los geoestacionales son las más importantes y los que más se utilizan en la actualidad. Con ellos es ahora posible comunicar lugares muy alejados o que previamente eran inaccesibles, y la cantidad y variedad de la información que transmiten y reciben es sorprendente. Por ejemplo, a cualquier parte del mundo -aún en el caso de que no se encuentre a bordo de una veloz embarcación en alta mar-, transmitir todas las páginas de un periódico -incluyendo

fotografías- a un lugar remoto para que se imprima localmente, realizar juntas de trabajo a distancia mediante teleconferencias, transmitir cursos de actualización y de realizar transacciones bancarias y rurales, efectuar diagnósticos médicos a cientos o miles de kilómetros de distancia, realizar transacciones bancarias, actualizar o consultar bancos de datos de computadoras, y muchas otras cosas más que contribuyen a la dinámica evolutiva de la sociedad.

1. HISTORIA DE LOS SATÉLITES (LAS DIFERENTES ETAPAS).

Las reflexiones en la luna aplicando las técnicas de radar fueron repetidamente demostradas en los finales de los 40's e inicios de los 50's. En julio de 1954, el primer mensaje de voz fue transmitido por la marina de los Estados Unidos mediante el trayecto "tierra-luna". En 1956 un servicio relevador lunar de la marina de los E.U. fue establecido entre Washington y Hawai. El circuito operó hasta 1962 ofreciendo una comunicación de larga distancia digna de confianza limitada sólo por la "disponibilidad" de la luna en los sitios de transmisión y recepción. La potencia utilizada fue de 100 kw, con antenas de 26 metros de diámetro a 430 Mhz.

Un globo metalizado puesto en órbita puede ser usado como reflector de ondas electromagnéticas generadas por un transmisor en tierra, parte de la energía puede ser recogida por estaciones receptoras en algún punto sobre la tierra, desde el cual el globo es visible, obteniendo de este modo un sistema pasivo de comunicación por satélite. A través de la acción conjunta de los laboratorios de telefonía Bell, la NASA y la JET Propulsión, el proyecto ECHO fue realizado. El satélite cuya forma era un globo, tenía un diámetro de 30 metros y estaba cubierto de nylon con lamina de aluminio. La órbita circular tenía una altura de cerca de 1600 Km. En 1960 se logró la transmisión de telefonía y T.V. gracias al sistema de F.M. en las bandas de 1Ghz y 2.5 Ghz.

Aunque los satélites tienen capacidad infinita para comunicaciones de acceso múltiple, son gravemente obstaculizados por el uso ineficiente del transmisor de potencia. En el experimento ECHO, por ejemplo, sólo una pequeñísima parte de la potencia transmitida es regresada a la antena receptora. Puesto que la señal se ve afectada por el ruido que llega desde varias fuentes, se utiliza, para compensar esto, amplificadores de bajo ruido en el receptor.

La ventaja de los satélites pasivos, es que no requieren de equipo electrónico sofisticado a bordo. Se usa para rastreo, un transmisor emisor de luz, pero en general

no es necesaria electrónica complicada. Tal simplicidad, más la carencia de electrónica espacial en los fines de los 50's, hizo interesante el sistema pasivo en los primeros años de la comunicación por satélite. Pero ya que en corto tiempo la electrónica espacial llega a estar disponible, los sistemas pasivos fueron reemplazados por sistemas activos.

El primer satélite activo de los E.U. fue el SCORE, lanzado el 18 de octubre de 1958. Este fue un satélite repetidor con retardo, recibiendo señales desde estaciones terrenas a 150 Mhz. El mensaje era almacenado en una cinta y después retransmitido. Los 68 kilogramos de carga útil fueron situados en una órbita baja con un perigeo de 182 km y un apogeo de 1048 km.

El equipo de comunicaciones estuvo energizado con baterías. Después de 12 días de operación estaban completamente descargadas y se detuvo la transmisión.

Después de indagar en el espacio con los satélites SPUTNIK, EXPLORER, VANGUARDIA, incluyendo los proyectos SCORE y COURIER, el mayor paso experimental en tecnología de satélites de comunicación activos, se realiza con los proyectos TELESTAR, RELAY y SYNCOM.

El proyecto TELESTAR es el más conocido probablemente porque fue el único capaz de retransmitir programas de TV.. a través del Atlántico. El primer TELESTAR se lanzó desde Cabo Cañaveral el 10 de junio de 1962. Era una esfera de 85 cm de diámetro pesando 80 kg., el vehículo de lanzamiento utilizado fue un cohete Thor Delta el cual situó al satélite en una órbita elíptica con un apogeo de 5600 km. en un período de 2.5 horas.

El TELESTAR II se construyó con mayor resistencia a la radiación, pero por lo demás fue idéntico a su predecesor. Fue lanzado en 1963.

La potencia de los TELESTAR I y TELESTAR II fue de 2.25 watts utilizando un tubo de ondas progresivas (TWT) con un ancho de banda de 50 Mhz a 6 y 4 Ghz. Ambos era de giro estabilizado. La capacidad es de 600 canales telefónicos o un canal de T.V.

El TELESTAR fue diseñado como un experimento y no fue destinado para operación comercial. Entre otras cosas, la órbita usada hizo a éste visible solamente por períodos breves. Un proyecto con objetivos similares, el proyecto RELAY, fue desarrollado por la Radio-Corporation de América bajo contrato con la NASA, siendo igualmente exitoso.

En 1963 la fuerza aérea de los E.U. logró poner en órbita un cinturón orbital compuesto de pequeños dipolos a 3700 km. actuando como reflector pasivo, se transmitió voz en forma digital en forma inteligible. Este proyecto fue el famoso WEST FORD.

En este mismo año se lanzó el primer satélite de comunicaciones en órbita geostacionaria. Este satélite fue puesto en órbita por la NASA y se utilizó para transmitir señales de T.V. en los juegos olímpicos de Tokio en 1964, este satélite fue el SYNCON.

Las primeras transmisiones comerciales por satélite comenzaron oficialmente en 1965, cuando se lanzó el primer satélite comercial en el mundo, el INTELSAT I (Pájaro madrugador)

Aunque los Estados Unidos han desempeñado un papel muy importante desde el principio en cuanto se refiere al campo de la comunicación por satélite la URSS también desarrolló algunos proyectos entre los que destaca el MOLNYA (Mayo de 1965) de órbita elíptica con un apogeo de 39152 Km. y período de 11 horas con 38 minutos.

Un satélite desde el punto de vista de las comunicaciones no es más que una repetidora colocada en el espacio. Un satélite no crea comunicaciones por si mismo, sino que sólo repite lo que recibe de la tierra. Algunas formas de comunicación previas a la comunicación vía satélite lo fueron las ondas de radio en la banda de HF, el cable y las redes terrenas de microondas.

En lo que respecta a las radiocomunicaciones por onda corta (banda HF) éstas sólo pueden proporcionar un número limitado de canales debido a la estrechez del ancho de banda utilizable. Hay que recordar, que a mayor frecuencia portadora se dispone

de un mayor ancho de banda y por lo tanto de mayor capacidad; en la actualidad la banda ya está saturada, además la propagación de esta banda está afectada por factores aleatorios ya que depende de la ionosfera, la cual es esencialmente irregular y cambiante introduciendo en consecuencia un importante porcentaje de incertidumbre.

Al considerar los enlaces de microondas en redes por tierra los problemas del ancho de banda (capacidad) y de la incertidumbre por la ionosfera son ampliamente superados constituyendo un medio de gran confiabilidad y capaz de manejar una gran capacidad de información (tanto en telefonía como en T.V.); sin embargo, no es factible su empleo en enlaces intercontinentales por la imposibilidad de instalar repetidoras con las características que ellas exigen, en medio de los océanos, (no olvidemos que las microondas sólo se propagan a línea de vista, es decir en línea recta). Fuera de esta dificultad, económicamente son convenientes.

En lo que respecta a los cables (sobre todo cable submarinos) tienen un ancho de banda que aunque es amplio, es limitado y su costo aumenta lógicamente con la extensión.

Del análisis efectuado anteriormente surge una alternativa como solución de los problemas planteados y consiste en establecer la comunicación mediante el uso de una repetidora colocada en el espacio: el satélite.

La utilización del satélite hace factible el uso de las microondas, con las ventajas inherentes a las mismas en cuanto a capacidad y confiabilidad, agregándose a esto la ventaja que significa el poder utilizar una sola repetidora para enlazar dos puntos situados a distancias considerablemente grandes en vez de una red de 30 ó 40 repetidoras. Por otra parte el satélite permite "el salto" de los océanos para lograr la comunicación intercontinental de alta capacidad.

Aunque la comunicación vía satélite nació como una necesidad para comunicar lugares muy distantes, como por ejemplo; un continente con otro continente, hoy en día se utiliza para comunicar lugares situados en el mismo continente, aún dentro del mismo país.

1.1 VENTAJAS DE LA COMUNICACIÓN VÍA SATÉLITE.

- 1. SIMPLIFICACIÓN DEL SISTEMA.** Debido a su grana altura (aproximadamente 36000 km.) se tiene línea de vista entre el satélite y cualquier estación terrena que esté dentro de su área de cobertura, la cual puede llegar a ser tal, que cubriría prácticamente el 40% de la superficie de la tierra con un solo . Esto simplifica enormemente el sistema ya que el satélite sustituye a las redes de microondas con los consiguientes ventajas tanto técnicas como económicas.
- 2. MAYOR CALIDAD.** Debido a que cualquier proceso electrónico degrada la señal al agregar algo de ruido (aunque sea en grado mínimo), debemos considerar la gran ventaja de manejar un enlace a través de una sola repetidora (el satélite), y por lo tanto una sola fuente de ruido, comparado contra un enlace utilizado en una red de microondas de 20 ó más repetidoras y por lo tanto 20 ó más fuentes de ruido. Definitivamente la calidad de la señal en un enlace vía satélite es mucho más alta que un enlace a través de una red de microondas.
- 3. MAYOR CONFIABILIDAD.** Otra consecuencia del hecho de utilizar una sola repetidora en vez de una red de ellas en los enlaces va satélite es la reducción de la posibilidad de fallas a una sola (el satélite), lo cual da un gran confiabilidad al sistema. Además hay que considerar las normas más estrictas que controlan la fabricación de un satélite lo que permite seguridad de su funcionamiento durante su tiempo de vida útil.
- 4. ALTA CAPACIDAD (VENTAJA PROPIA DE LAS MICROONDAS).** Aquí podríamos hace énfasis en la ventaja de usar las microondas como frecuencias portadoras, lo que permite disponer de un ancho de banda amplio y por lo tanto tener una mayor capacidad de manejo de infamación. De hecho, los satélites tienen capacidad para manejar hasta 24 canales de televisión simultáneamente, o su equivalente en telefonía (aproximadamente 960 canales telefónicos por cada canal de televisión).

5. VENTAJAS DE TIPO SOCIAL. Por medio de los satélites se tiene acceso a lugares que por medio de otros sistemas de comunicación no se podría, este es el caso de regiones pantanosas, bosques, islas, etc..

1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SATÉLITES.

1.- DE ACUERDO A SU PRINCIPIO DE OPERACIÓN. Podemos clasificar a los satélites en pasivos y activos, de acuerdo a su principio de operación. Consideramos a un satélite como pasivo si actúa solamente como superficie reflectora y activo si se involucra un proceso electrónico en el satélite (grabación, reproducción, amplificación, cambio de frecuencia, etc.).

2.- DE ACUERDO A SU APLICACIÓN. Podemos clasificar a los satélites en dos grupos: civiles y militares. Dentro de los civiles podemos incluir los de comunicaciones, los meteorológicos, los de investigación, etc..

3.- DE ACUERDO A SU ÓRBITA. Por su órbita los podemos clasificar en geostacionarios y no geostacionarios. Un satélite geostacionario es aquel que permanece fijo respecto a la tierra, es decir, visto desde la tierra parecería como un punto fijo en el cielo. Un satélite no geostacionario aparecería siempre en movimiento con respecto a la tierra, un ejemplo de esto es la luna.

En general podemos decir que los sistemas de comunicación vía satélite requieren de una órbita geostacionaria por las ventajas que esto implica:

A) Al permanecer fijo el satélite con respecto a la tierra no es necesario rastrear el movimiento para orientar la antena, es decir, una vez que se localiza el satélite y se orienta la antena ésta permanece fija, factor que gravita preponderantemente en el costo de la estación terrena.

B) Una vez orientada la antena se dispondrá del satélite ya que éste permanece fijo, lo que permite la continuidad del sistema las 24 horas del día, condición necesaria en un buen sistema de comunicaciones.

4. DE ACUERDO A SU COBERTURA. Clasificaremos a los satélites de acuerdo en su cobertura en globales y domésticos. Un sistema será global cuando su

transmisión cubra todo el espacio sobre la superficie de la tierra, de acuerdo a la línea de vista del satélite. En la práctica un 40% de la superficie de la tierra desde un satélite geoestacionario. Un satélite será de cobertura doméstica cuando su transmisión cubra sólo un área específica que puede ser grande o pequeña según los requerimientos (por ejemplo un país).

Técnicamente la diferencia entre un satélite y otro es solamente la antena que es la que define el tipo de cobertura. En el caso de un satélite de cobertura global por ejemplo los INTELAT de uso internacional, la antena comúnmente utilizada es del tipo cometa, mientras que en los de cobertura doméstica, los MORELOS por ejemplo, la antena es de tipo parábola. Los sistemas globales son para comunicaciones internacionales e intercontinentales, mientras que los domésticos son para comunicaciones locales (dentro del mismo país).

2. LANZAMIENTO Y COLOCACIÓN DE ÓRBITA GEOSTACIONARIA.

2.1 EL CINTURÓN CLARKE.

En 1945, Arthur C. Clarke sugirió en una de sus publicaciones la posibilidad de colocar satélites artificiales en una órbita tal que al observarlos desde un punto sobre la superficie de la Tierra parecería que no se moviesen, como si estuviesen colgados en el cielo. Los satélites no cambiarán aparentemente de posición y esto traería consigo grandes ventajas pues, tal como se verificaría años más tarde, su operación se simplificaría y el costo de los tipos terrestres necesarios para utilizarlos se reduciría, en relación con el uso de otras órbitas. además, casi la totalidad del mundo habitado se podría intercomunicar por radio con solo tres satélites colocados en esa órbita tan especial (Fig. 2.1). Como sería posible lograrlo, si los satélites deben moverse a gran velocidad, para no perder altura y caer hacia la tierra, atraídos por ella?. La tierra gira sobre su propio eje, completando una vuelta cada 24 horas; si se coloca a un satélite de tal forma que gire circularmente alrededor de ella en un plano imaginario que la atraviese por el círculo ecuatorial, y si el satélite también completa

una vuelta en 24 horas, entonces para un observador sobre un punto fijo de la Tierra, se produce la ilusión de que el satélite no se mueve.

La idea de Clark era muy buena y debían cumplirse varios requisitos para que el satélite fuese en verdad fijo con respecto a la Tierra, es decir geostacionario. En primer lugar, el satélite debía desplazarse en el mismo sentido de la rotación que la Tierra; además para que no perdiese altura poco a poco y completase una vuelta cada 24 horas, debía estar a aproximadamente 36000 km. de altura sobre el nivel del mar; para lograrlo el satélite debía tener una velocidad constante de 3075 m/s, siguiendo una órbita circular alrededor de la tierra (Fig. 2.2).

Sin duda fueron muchos los científicos e ingenieros que leyeron con interés las ideas de Arthur C. Clarke y de otros autores contemporáneos. Cabe mencionar que en aquel entonces no se lanzaba ni siquiera el primer satélite artificial de la tierra, ya no se diga en órbita geostacionaria a 36000 km. de altura sobre el nivel del mar, sino aunque fuese a unos cuantos cientos de kilómetros de distancia. pero llegó el día en que la era espacial se inició, en 1957, con el lanzamiento del Sputnik 1, y después de varias pruebas con algunos otros satélites en esos primeros años, al fin se colocó en órbita el primer satélite geostacionario del mundo, llamado SYNCOM. Poco más tarde, había un satélite Intelsat III sobre cada uno de los océanos principales (Atlántico, Pacífico e Índico), intercomunicando al mundo; era el año de 1968 y los sueños de Clark se habían convertido en una realidad, 23 años después de haber publicado sus ideas.

La órbita en cuestión recibe el nombre de órbita geostacionaria, pero con frecuencia muchos autores e investigadores también se refieren a ella como el cinturón de Clarke, en justo reconocimiento a su promotor. En la actualidad, esta es la órbita más congestionada al rededor de la tierra; muchos propietarios de satélites, si no todos, quieren estar ahí por obvias razones de sencillez y bajo costo de operación. En ella se encuentran satélites de apariencia física y aplicaciones muy diversas: meteorológicas, militares, experimentales y de comunicaciones.

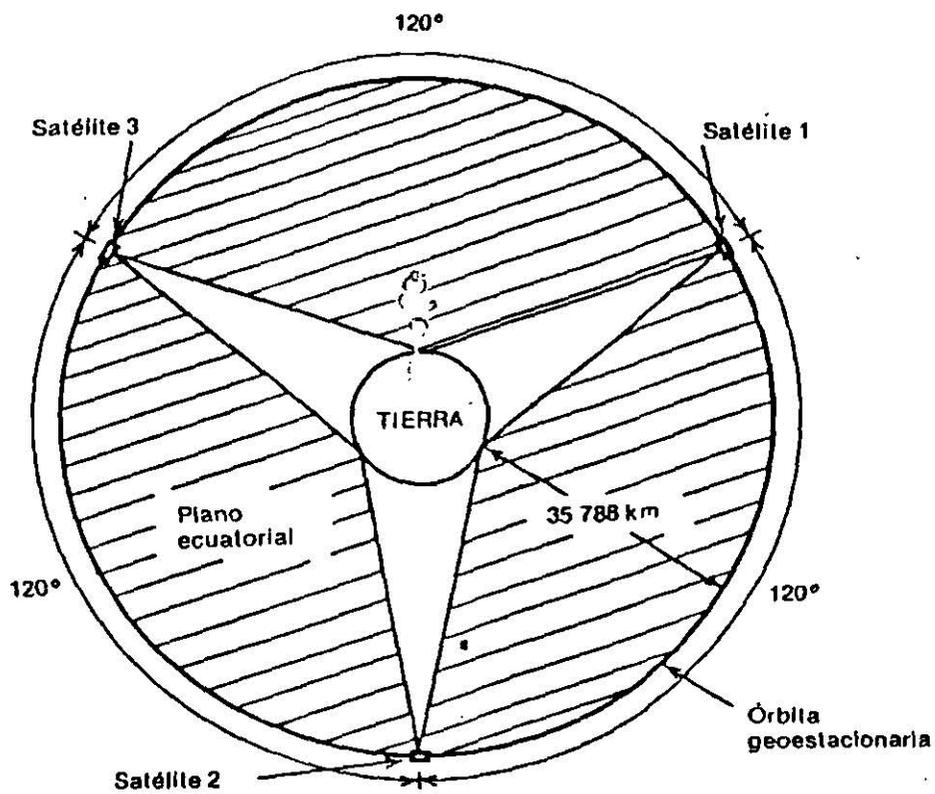


Figura 1.1 Clarke indicó que con solamente tres satélites en órbita geoestacionaria sería posible intercomunicar por radio a casi la totalidad del mundo habitado, desde luego con una limitación en la cantidad de tráfico simultáneo.

LANZAMIENTO Y COLOCACIÓN EN ÓRBITA GEOESTACIONARIA 3

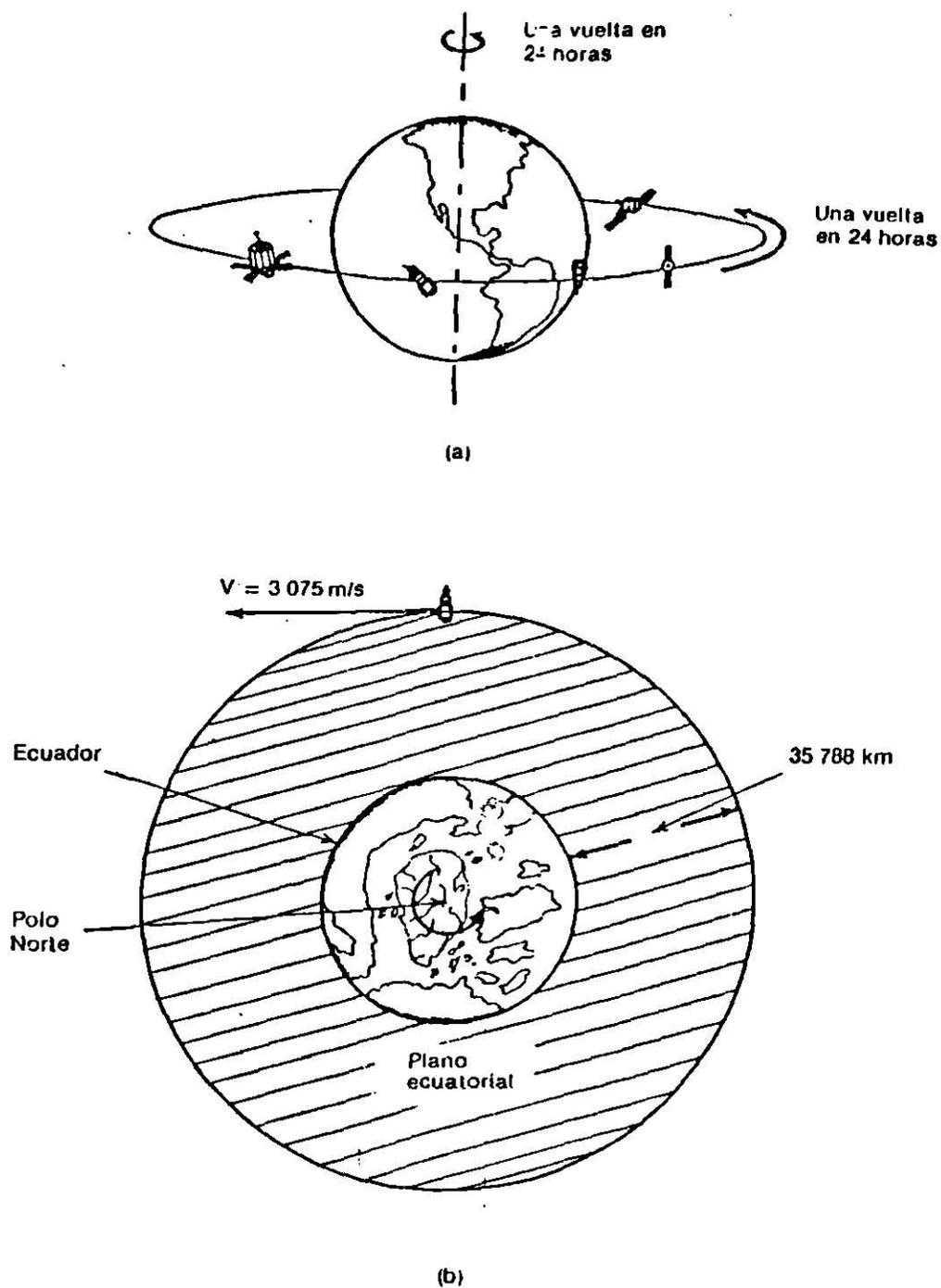


Figura 1.2 Los satélites geoestacionarios giran alrededor de la Tierra sobre el plano ecuatorial, completando una vuelta en 24 horas. Para un observador sobre un punto fijo de la Tierra, los satélites no se mueven. a) Vista lateral; b) vista superior.

2.2 COMO LLEGAR A LA ÓRBITA GEOSTACIONARIA.

Sin las leyes de Isaac Newton que rigen la mecánica clásica, seguramente los científicos del siglo XX no hubieran podido colocar satélites alrededor de la tierra. Gracias a el se sabe que la fuerza de atracción entre un cuerpo y la tierra es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que hay entre ambos y directamente proporcional al producto de sus masas; asimismo, que si a un cuerpo se le aplica una acción (p. ej., una fuerza), entonces este responde con una reacción igual y de sentido contrario, oponiéndose a la acción original. Estas deducciones de Newton que datan del siglo XVII hacen posible que el hombre actual lance al espacio vehículos de carga (cohetes o lanzadores) con satélites artificiales en su interior, y que estos últimos conserven su posición orbital en el espacio una vez que han llegado ahí.

Todos los sistemas satelitales hacen uso de los principios anteriores y de muchos otros, como por ejemplo las leyes de Kepler, que explican el movimiento de los planetas alrededor del sol, pues los satélites se pueden interpretar en sentido figurado como si fuesen planetas y la tierra como un sol, aunque todo a escala mucho menor. En teoría, el numero de tipos de órbita en los que un satélite se puede colocar alrededor de la tierra es infinito, pero como ya se indico anteriormente, la mas codiciada y utilizada de las órbitas posibles es la geostacionaria. Para llevar a un satélite a esa órbita tan especial existen tres procedimientos distintos, los cuales se describen a continuación.

2.2.1. Inyección directa en órbita geostacionaria.

En este caso el satélite es transportado por un cohete de varias etapas hasta el cinturón de Clarke, sin que se necesite realizar esfuerzos propios, lo que en cambio si es necesario en los otros dos procedimientos que se explican mas adelante. La inyección directa en órbita geostacionaria es muy costosa y solo se utiliza para lanzar satélites militares, como el satélite no realiza esfuerzos propios, es decir, no lleva motores acoplados directamente a el, para pasar de una órbita a otra, la probabilidad de que llegue a su destino en buenas condiciones aumenta. El cohete

Titán III C de los EE. UU. es un ejemplo de lanzador que puede emplearse con este fin.

2.2.2. Inyección inicial en órbita elíptica.

En este procedimiento las etapas del sistema lanzador colocan al satélite en una órbita elíptica de gran excentricidad, es decir, muy alargada, en la que el centro de la tierra es uno de los dos focos. Una vez ahí, el satélite se separa del cohete y da una o varias vueltas en esa órbita, llamada de transferencia geosincrona, hasta que se lleva a cabo la siguiente etapa del proceso, ya con esfuerzos propios de el mismo.

El perigeo de la órbita de transferencia geosincrona esta normalmente a una altura aproximada de 200 km. sobre el nivel del mar y su apogeo cerca de los 35788 km., que es la altura final en la que el satélite debe quedar para funcionar. El paso siguiente es circularizar la órbita y para ello el satélite lleva acoplado un motor que se enciende precisamente en el punto de apogeo de la última vuelta elíptica que se haya programado; obviamente, el encendido se efectúa después de haber orientado al satélite a control remoto en forma adecuada, para que el empuje del motor de apogeo resulte en la dirección correcta. Al encenderse este, el satélite recibe un incremento sustancial de velocidad y su órbita cambia, pasando de la elíptica de transferencia geosincrona a la circular geostacionaria.

2.2.2. Inyección inicial en órbita circular baja.

Esta es la técnica empleada por el Sistema de Transportación Espacial de la NASA de EE. UU., mejor conocido como orbitador, y consiste en tres pasos, los dos últimos son idénticos al caso anterior de inyección inicial en órbita elíptica, y el primer paso se describe a continuación.

El obrador despegando llevando al satélite en su compartimiento de carga y entra en órbita alrededor de la tierra siguiendo una trayectoria circular, a una altura aproximada de 300 km. sobre el nivel del mar.

En una de las muchas vueltas que da la nave, el satélite es liberado o arrojado del compartimiento de carga, quedando de esta forma también en órbita circular baja

alrededor de la tierra, aunque separado del vehículo espacial; la velocidad inicial del satélite es la misma que la de la nave, aunque ligeramente modificada por efecto de los resortes que se emplean para arrojarlo del compartimiento de carga. La separación se efectúa cuando la nave va cruzando el plano del ecuador, y cuarenta y cinco minutos más tarde, cuando el satélite vuelve a cruzar el plano del ecuador, su motor de perigeo se enciende. Este le da un empuje tal que modifica su órbita, cambiándola de circular baja o de estacionamiento a una elíptica, similar a la del segundo caso explicado anteriormente, en la sección 2.2.2. Una vez que ha cumplido su función, el motor de perigeo se desprende del resto del cuerpo del satélite, dando así las condiciones adecuadas para que, mas adelante y en el momento preciso, un motor de apogeo acoplado al cuerpo del satélite se encienda para circularizar la órbita con su altura final.

En realidad, el procedimiento para colocar un satélite en órbita geostacionaria no es tan simple como parece ser de acuerdo con los tres métodos descritos. No solamente hay que proporcionarle cambios o incrementos de velocidad de satélite para modificar la geometría de las órbitas que formen parte del procedimiento elegido, sino que al mismo tiempo también hay que lograr pasar de un plano a otro, y todo ello haciendo el menor consumo de energía (combustible) para reducir los costos de lanzamiento. A continuación se describe con mayor detalle el caso particular en el que se utiliza el Sistema de Transportación Espacial de la NASA.

2.3. EL ORBITADOR Y LA ORBITA HOHMANN.

Una de las varias aplicaciones de los orbitadores norteamericanos es colocar satélites en órbita circular baja, y como ya se vio en la sección 2.2.3, estos se desplazan posteriormente con esfuerzos propios hasta llegar a la órbita geostacionario. El comportamiento de carga o bodega de un orbitador tiene 18.3m de largo y 4.6m de diámetro, y en el se pueden colocar uno o varios satélites, dependiendo de las dimensiones y peso que cada uno de ellos tenga.

Cada satélite -acoplado a sus propios motores de propulsión de perigeo y apogeo- se coloca sobre una mesa de giro que posteriormente será activada durante la misión, poco antes de que se deje al satélite en órbita circular baja.

El orbitador despega desde Cabo Kennedy, situado a 28.5° de latitud norte, y pocos minutos después entra en órbita circular alrededor de la tierra, a una altura promedio de 300 km. sobre el nivel del mar; el plano de la órbita de cielo forma un ángulo de 28.5° con respecto al plano ecuatorial (Fig. 2.3).

Antes de liberar o soltar el satélite del comportamiento de carga, el astronauta responsable de hacerlo debe de utilizar una de las computadoras y una pantalla fosforescente para verificar que todos los elementos que formen al satélite se encuentren en buenas condiciones; es decir, se revisa su estado de salud.

Esta es una gran ventaja que presentan los orbitadores, puesto que en el caso de que durante el ascenso alguna parte del satélite se haya dañado, aun se tiene la alternativa de tratar de repararlo, o bien de traerlo de regreso a la tierra, cosa que no es posible hacer con ningún otro tipo de lanzamiento actual.

Cuando el astronauta ha verificado que las partes del satélite se encuentran en orden, procede a dar a la computadora las instrucciones para activar los mecanismos de liberación. Se activa la mesa de giro sobre la que va colocado el satélite, hasta que alcanza una velocidad angular de aproximadamente 50 revoluciones o vueltas por minuto, y en el momento en que el orbitador intersecta al plano ecuatorial, se desactiva un sistema de resortes a presión, que lleva una buena cantidad de energía potencial almacenada; al tratar de retomar su condición física original, los resortes empujan al satélite hacia afuera, actuando como si fueran una catapulta. El satélite se ha separado del orbitador, girando como un trompo, lo cual le da estabilidad giroscópica, y se aleja cada vez más de la nave debido al movimiento inercial adquirido.

Sin embargo, la órbita del satélite sigue siendo circular, como cuando iba almacenado en el comportamiento de carga del orbitador; además, el plano sobre el cual viaja sigue formando un ángulo de inclinación de 28.5° con respecto al plano

ecuatorial. ¿Como se modifican los parámetros de la órbita, así como el plano de vuelo?

El procedimiento que se utiliza para llevar al satélite a su posición final se basa en los trabajos que el científico alemán Walter Hohmann desarrollo en los años veinte como parte de sus estudios de viajes interplanetarios. El objetivo del procedimiento es realizar los cambios de órbita y plano de desplazamiento con el menor consumo de energía posible. Para ello, la siguiente etapa debe ser pasar al satélite de su órbita circular baja a una órbita elíptica muy alargada, cuyo perigeo este a la altura de la órbita circular baja y su apogeo este a la misma altura que la de la órbita circular final, en este caso la geostacionaria. Como ya se indico antes, la órbita elíptica en cuestión se llama órbita de transferencia geosincrona, también conocida como órbita de transferencia de Hohmann.

Es evidente que para que el satélite pueda desplazarse de una órbita a otra necesita contar con un sistema propio de propulsión. El más común se conoce como PAM2 o modulo de asistencia de carga del cual existen varias versiones. Se trata básicamente de un motor de perigeo desechable, que va acoplado a la parte inferior del satélite.

Este módulo de asistencia debe ser capaz de empujar al satélite con la fuerza y duración necesarias para que este tome la inercia suficiente y alcance la altura final del apogeo de la órbita elíptica de transferencia.

Cuarenta y cinco minutos después de que el satélite fue liberado del comportamiento de carga, cuando el orbitador atravesaba el plano ecuatorial, el satélite vuelve a cruzar dicho plano. En este preciso momento, controlado por un reloj o secuenciador de la ignición, el modulo de asistencia se enciende en forma automática e impulsa rápidamente al satélite, colocándolo en la órbita elíptica deseada. El encendido del motor debe durar aproximadamente 80 segundos en forma ininterrumpida; de lo contrario, el satélite no alcanza la altura final deseada y se convierte en una pérdida, pues queda como chatarra espacial alrededor de la tierra, a menos que esto pueda remediarse de alguna manera.

Los motores del tipo PAM utilizan combustible sólido y la forma en que este se consume en el interior del motor no siempre es uniforme, lo cual puede producir un vector de empuje no alineado con el eje del cuerpo del satélite, y en consecuencia un cambio indeseable de rumbo. Para cancelar estos efectos de un posible empuje desbalanceado se hace girar al satélite poco antes de liberarlo del compartimiento de carga.

A los 80 o poco más segundos después del encendido, el combustible del motor se termina, y para eliminar esta carga muerta un sistema de explosivos separa el PAM del cuerpo del satélite. Este, ya con la suficiente inercia adquirida, continua ascendiendo por si solo hasta alcanzar el apogeo de su nueva órbita e iniciar después su descenso hacia su perigeo. A continuación se rastrea el satélite durante varias vueltas elípticas, para determinar sus condiciones físicas y orientarlo adecuadamente antes de iniciar el tercero y último paso, que consiste en dar la orden a control remoto para que se encienda otro motor más pequeño. que forma parte del satélite. Este es el motor de apogeo, que le da un nuevo impulso para cambiar su velocidad y su dirección y colocarlo en órbita geostacionaria.

La órbita elíptica de transferencia esta, para este caso, sobre un plano inclinado 28.5° con respecto al plano ecuatorial. Es evidente que dos de los puntos de intersección entre ambos planos, son el perigeo y el apogeo, mismos que, respectivamente, se denominan nodos de ascenso y descenso; en un nodo debe cambiarse la velocidad del satélite para circularizar la órbita y al mismo tiempo entrar al plano ecuatorial. Cuanto menor sea la velocidad que lleve, será más fácil corregir su rumbo y menor la cantidad de combustible necesario para hacerlo; por lo tanto el punto de apogeo es idóneo para realizar esta maniobra, ya que ahí es donde el satélite alcanza su velocidad mínima. Antes de encender el motor de apogeo, el satélite debe ser orientado de tal forma que el vector de velocidad resultante de la suma de la velocidad que lleva con la del empuje que se le aplique sea paralelo al plano ecuatorial y de la magnitud suficiente para mantenerlo en órbita geostacionaria sin perder altura.

La rotación de la tierra y la posición longitudinal final del satélite en el arco geostacionario determinan cuantas vueltas elípticas debe dar el satélite antes de elegir el apogeo apropiado para efectuar las correcciones indicadas de velocidad. Desde luego, después hay que realizar todavía varias maniobras correctivas de ajuste, para circularizar la órbita de la mejor manera posible y ubicar al satélite en su posición precisa, es decir, en la longitud este u oeste que se le haya asignado para operar.

Los conceptos ilustrados en la figura 1.4 también son validos para el caso en que la inyección inicial se haga en órbita elíptica, tal como se describió en la sección 2.2.2; sin embargo, al ángulo formado entre el plano ecuatorial y el plano de la órbita elíptica depende de la latitud geográfica del centro del lanzamiento utilizado. Mientras este centro este más cerca del ecuador, dicho ángulo será menor, así como el incremento de velocidad necesario y la cantidad de combustible para generarlo; en consecuencia, el costo de colocación en órbita geostacionaria también se reduce.

2.4 RESCATE DE SATÉLITES.

Considerese que por alguna razón el satélite no hubiese podido llegar a su posición final. ¿Sería posible aprovecharlo aun en esas condiciones, o al menos rescatarlo?. La respuesta es afirmativa, los satélites si se pueden rescatar, pero salvo pocas excepciones hay que traerlos de regreso hasta al superficie de la tierra, para revisarlos y volver a intentar llevarlos hasta la órbita geostacionaria, acoplándoles motores nuevos de propulsión propia. Esta operación se llevo a cabo por primera vez hace algunos años, para rescatar los satélites Westar VI de EE. UU. y Palapa B de Indonesia; para ello se utilizo el orbitador de la NASA, que los trajo almacenados en su comportamiento de carga.

Sin embargo, es preciso recordar que los orbitadores vuelan en órbita circular baja a unos trescientos kilómetros de altura sobre el nivel del mar ¿Como es posible entonces rescatar satélites que se encuentran a la deriva a miles de kilómetros de distancia? Más adelante se hablará del subsistema de propulsión de un satélite,

diseñado para ser útil durante todos los años previstos para que el satélite funcione. Como los propulsores de este subsistema consumen combustible cada vez que deben ser activados, el satélite lleva en su interior tanques con combustible almacenado para todas estas maniobras que se realizarán a través de varios años.

Retómese ahora el caso de un satélite que no haya logrado llegar a la órbita geostacionaria, como de hecho ocurrió con el Westar VI y el Palapa B, cuyos motores de perigeo o PAM no permanecieron encendidos durante 80 segundos, sino que se apagaron mucho antes, impidiendo que el satélite alcance la altura final deseada. Pocos segundos después del encendido, el PAM se había apagado inexplicablemente, quedando cada satélite abajo de la altura geostacionaria. Era preciso bajarlos de alguna manera hasta la altura en que vuelan los orbitadores, para que los astronautas pudieran salir de la nave a capturarlos y almacenarlos en los compartimientos de carga.

Por lo tanto el combustible almacenado en cada satélite, que se había previsto para operarlo durante todos sus años de vida, se utilizó , a través de muchísimas maniobras, para irlos bajando poco a poco, hasta que quedaran al alcance de los orbitadores. No era posible reparar los satélites en el espacio, a menos que tuviesen los medios para volver a llenar sus tanques de combustible y ponerles un nuevo motor PAM, y hasta la fecha aun no es posible hacerlo.

La única alternativa que se tuvo en esa ocasión fue traerlos de regreso a la tierra para que las compañías aseguradoras los repararan o vendiesen y recuperaran parte de sus pérdidas económicas.

3. EL SATELITE Y EL MEDIO AMBIENTE DEL ESPACIO.

3.1 EL SATELITE Y SU NUEVO HOGAR.

El satélite ha llegado a su posición final en el cinturón de Clarke, autorizada a su propietario con años de anticipación por Unión Internacional de Telecomunicaciones. Sin embargo, no es el primero en llegar ahí; hay muchos otros satélites en el mismo cinturón, algunos jóvenes y otros viejos, de configuraciones,

tamaños y aplicaciones distintas; muchos de ellos reciben y transmiten señales en las mismas frecuencias que el satélite recién llegado también usara durante su funcionamiento, por muchos años.

Afortunadamente, aunque todos son vecinos, no se encuentran colocados en el mismo punto; de hecho, están separados entre sí por dos o tres grados de arco, equivalentes a 1500 y 2200 kilómetros respectivamente, con lo cual se garantiza que no exista ningún riesgo de interferencia radioeléctrica entre ellos. Además, la posición en longitud de cada uno depende de la zona geográfica que se encargue de intercomunicar. Por ejemplo, un satélite diseñado para prestar servicios de telecomunicaciones a la India se colocará en órbita geostacionaria sobre el océano Índico y no al otro lado de la tierra, sobre el océano Pacífico, al sur de México; allí de nada le serviría el sistema a la India, a menos que la energía radiada por el satélite pudiese atravesar el planeta y ser capturado por antenas hindúes que estuvieran apuntando hacia el centro de la tierra y no hacia el cielo.

De cualquier forma, hay ciertas secciones del cinturón de Clarke que son más codiciadas que otras y que por lo tanto se encuentran sumamente pobladas. La zona de mayor tráfico internacional de señales radioeléctricas vía satélite es la del océano Atlántico, debido a que a sus lados se encuentran los países industrializados de América del Norte y Europa. Por lo que se refiere al tráfico interno o doméstico de señales, se intuye que una de las zonas más congestionadas, por la gran demanda de servicios que allí hay, tanto en variedad como en cantidad, es la sección del arco ecuatorial comprendido por las longitudes geográficas de México, EE. UU. y Canadá, así como las longitudes más cercanas a sus territorios.

Regresando al satélite recién llegado, este no debe causar problemas de interferencia ni degradaciones en la calidad de las señales recibidas o transmitidas por él, y por lo tanto debe permanecer ahí lo más fijo que se pueda. Es decir, aun cuando se este moviendo a gran velocidad alrededor de la tierra para mantener su posición geostacionaria, no debe desviarse de su trayectoria y tampoco debe cambiar la orientación de su cuerpo con respecto a la superficie terrestre.

Sin embargo, el satélite no puede cumplir del todo con los requisitos anteriores, ya que varias fuerzas se encargan de dificultarle su tarea, empujándolo o tirando de él de un lado a otro, de tal forma que se le puede imaginar, aunque sea en forma muy exagerada, como una botella que flota sobre las olas del mar cambiando su posición y orientación constantemente. Necesita ayuda para resolver todos estos contratiempos, y tener asimismo cierta flexibilidad de movimiento limitado, nunca se le puede decir "no te muevas ya", como por arte de magia, pues las fuerzas externas se encargarán de volver a moverlo. A través del subsistema de propulsión del satélite es posible ayudarle a corregir su orientación y posición, enviándole comandos a control remoto en forma periódica.

En la figura 3.1 se muestran las dimensiones de una gigantesca caja imaginaria en cuyo centro estaría colocado el satélite en el espacio; notese que cada lado de la caja mide muchos kilómetros. Mientras el satélite se mueva dentro de ella, no habrá ningún problema, pero hay que rastrearlo permanentemente para observar su posición y encender el subsistema de propulsión a control remoto antes de que se salga, para así regresarlo al otro lado de la caja. Claro está que para realizar todas estas maniobras con precisión, se necesita contar en tierra con un centro de control espacial computarizado y que el satélite le envíe cierto tipo de información, que le permita a los operadores, y a las computadoras, hacer sus cálculos y tomar las decisiones correctas.

Cada vez que el subsistema de propulsión se activa para corregir la orientación y la posición del satélite se consume combustible y poco a poco los tanques de almacenamiento se van vaciando. ¿Que ocurre cuando ya no hay combustible en los tanques de almacenamiento, después de varios años de haber realizado gran número de maniobras correctivas?

Simplemente, ya no es posible mantener al satélite dentro de la caja imaginaria, y tampoco orientarlo correctamente hacia la superficie de la tierra a la que le debe de dar servicio, se corre el grave riesgo de causarle interferencia a otros sistemas,

El campo magnético de la tierra también produce un par o fuerza perturbadora sobre el satélite, pero en realidad su efecto es despreciable en comparación con las fuerzas comentadas anteriormente. Existen, además, otras cuya aparición o efecto son imperdibles, producidas por el impacto de meteoritos. <cuando hay una colisión de un meteorito con satélite, el primero le trasmite un momento al segundo, que modifica ligeramente su posición y orientación.

Por otras parte, la posición y orientación del satélite no son modificadas por las fuerzas externas que han mencionado, sino que el propio satélite también genera otras fuerzas perturbadoras. El simple hecho de que haya movimiento produce pares o fuerzas que afectan al satélite. Conviene apuntar que conforme los tanques de combustible se van vaciando, el centro de masa del satélite cambia; por lo tanto, cuando se activa el subsistema de propulsión para corregir errores en posición y orientación , el empuje resultante no se aplica precisamente sobre el centro de masa; esto produce pares o fuerzas igualmente perturbadoras durante la realización de las correcciones.

Por último, la misma radiación radioeléctrica de las antenas del satélite produce una presión, cuyo efecto es importante cuando la potencia de transmisión del satélite es alta y esta concentrada en un haz de iluminación , muy angosto. Esta fuerza origina un giro del satélite, y para reducir al máximo su efecto sobre el, se debe diseñar con antenas colocadas simétricamente con respecto a su centro de masa, o bien, el eje de radiación principal de la antena debe contener dicho centro de masa.

Como puede verse, el nuevo hogar del satélite es muy inestable, y por ello su subsistema de propulsión es sumamente importante para poder mantenerlo dentro de la habitación que le corresponde en el espacio. es decir, dentro de su caja imaginaria. Sin embargo, hasta ahora solo se ha hablado de los efectos perturbadores mecánicos o de movimiento sobre el satélite; a continuación se mencionan otros, que también pueden alterar su funcionamiento correcto, como son la radiación solar, las partículas cósmicas y los eclipses.

3.3 LA TEMPERATURA DEL SATÉLITE.

El satélite está integrado por un gran número de elementos, todos ellos fabricados con distintos materiales y diseñados para realizar funciones diversas. Por ejemplo, las celdas solares trabajan con mayor eficiencia entre -100°C y $+50^{\circ}\text{C}$. La electrónica y los sensores infrarrojos, entre otros componentes, también requieren específicos de temperatura para funcionar bien. Por lo tanto, es preciso garantizar un control térmico eficaz en la estructura del satélite y en cada uno de sus equipos para que no falle. El mecanismo para hacerlo es muy complejo, pues se necesita mantener un balance térmico entre la energía que el satélite recibe por la radiación de fuerzas externas y la energía que el mismo disipa internamente. El problema se complica aún más si se considera que la energía de las fuentes externas cambia constantemente conforme el satélite gira alrededor de la tierra, ya que según la hora del día y la época del año la magnitud de la radiación que recibe del sol y de la tierra es variable.

La principal fuente de radiación externa es el sol, y aun cuando causa algunos problemas para conservar el balance térmico en el satélite, es obvio que sin él no sería posible generar electricidad a través de las celdas solares: por supuesto sin él habría vida sobre la superficie de la tierra y muchos menos satélites artificiales girando de ella. Por un lado el sol permite generar electricidad para que el satélite funcione, pero por otro complica el diseño del mismo. En todo momento el satélite tiene varias de sus partes expuestas a distintas temperaturas; mientras la cara que está orientada al sol se calienta mucho, las partes no iluminadas se enfrían (Fig. 3.2). En el interior del satélite, la transferencia de calor se lleva a cabo por conducción, y en el espacio por radiación, puesto que el medio ambiente de casi vacío excluye la posibilidad de que en este último se pueda transferir por convección. En cuanto a la contribución térmica de la tierra, esta consiste en radiación infrarroja emitida por ella misma y de la reflexión de los rayos solares sobre su superficie, denominada albedo; sin embargo, el efecto térmico de su radiación total es despreciable en comparación con el producido por la radiación solar directa.

Por otra parte, cuando ocurre un eclipse, el satélite se enfría machismo al interponerse la tierra entre el y el sol, sino que además no puede transformar energía solar en electricidad; en estas condiciones, necesita obtener su energía de algunas otra fuente para seguir funcionando. Esta fuente de respaldo esta constituida por varias baterías que forman parte del satélite, y gracias a ellas el servicio no se interrumpe durante un eclipse o en la noche terrestre.

3.4 OTROS FACTORES DE PERTURBACIÓN.

Hasta ahora se han visto ya la mayor parte de los factores que alteran el funcionamiento correcto de un satélite geoestacionario y que, por consiguiente, exigen en el un buen diseño y una supervisión y un control permanentes. A continuación se mencionan algunos otros factores importantes que complican aún más la vida operativa del satélite.

La radiación ultravioleta del sol causa que los materiales del satélites ionicen; esto produce un aumento en la conductividad de los aisladores y cambios en las características de emisión y absorción de calor de los materiales protectores. Además, la misma radiación degrada poco a poco la eficiencia de las celdas solares, que después de varios años de trabajo y de estar expuestas al sol reducen su eficiencia en un 20% a 30%.

En medio ambiente de casi vacío ocasiona, por su parte, que los metales y los semiconductores se sublimen y tiendan a evaporarse. La cantidad de masa que pierden depende mucho de la temperatura, pero en realidad estas pérdidas son despreciables siempre y cuando los materiales utilizados para proteger al satélite no sean muy delgados. hay otros efectos que pueden resultar mas dañinos, como es la posibilidad de que se condensen gases en superficies frías y produzcan un cortocircuito en materiales aislantes. Como punto a su favor, el medio ambiente de casi vacío tiene la ventaja de que elimina la posibilidad de que haya problemas por corrosión.

Adicionalmente, las partículas cósmicas que inciden sobre el satélite ocasionan que sus plásticos se ionicen y que la eficiencia de sus celdas solares se degrade aún más; por si fuera poco, también pueden modificar el acabado de las superficies diseñadas para controlar su balance térmico. En la sección 3.2 se menciona que los meteoritos podían modificar la orientación y posición del satélite, pero además de esto, algunas también pueden perforar partes de su exterior, por la enorme energía que traen consigo a la velocidad que viajan. Este efecto podría resultar desastroso para la supervivencia del satélite, y por ello su estructura debe tener la rigidez suficiente y la capacidad de amortiguamiento para resistir impactos de poca intensidad.

Con todo esto se ha descrito someramente el medio ambiente hostil en el que un satélite geoestacionario debe sobrevivir durante varios años. No sería extraño que en son de broma y si los satélites pudiesen hablar entre si, uno de ellos le dijera al recién llegado: "Bienvenido a casa". Lo que si es cierto es que diseñar un sistema de comunicaciones por satélite es un verdadera obra de arte tecnológica, en la que intervienen cuando menos las ramas de la astronomía, mecánica, electricidad y electrónica, computación, comunicaciones, ciencia de materiales, química e ingeniería civil.

BIBLIOGRAFÍA.

LIBRO.- SATÉLITES DE COMUNICACIONES.

AUTOR.- RODOLFO NERI VERA

EDITORIAL.- MC. GRAW HILL

FOLLETO.- COMUNICACIÓN VÍA SATÉLITE.

AUTOR.- ING. FERNANDO ESTRADA S.

EDITORIAL.- DEPARTAMENTO DE COMUNICACIONES DE FIME.

además de otros problemas operativos en tierra, y la única solución es apagar el satélite, concediéndole su jubilación.

El número de años que pueda trabajar sin problemas, es decir su vida útil, depende en gran medida de la eficiencia con la que los operadores en tierra administren el combustible contenido en los tanques de almacenamiento del satélite.

3.2 LAS FUERZAS PERTURBADORAS.

¿Cuales son las fuerzas que causan tantos problemas para conservar el satélite fijo en su posición geostacionaria? La fuerza que mas le afecta es el campo gravitación de la tierra. Este campo no es esféricamente uniforme, pues la distribución de la masa del planeta no es homogénea. Es decir, si se imaginase a una gran esfera en cuyo centro este el centro de la tierra, y si pudiese medirse de alguna forma la intensidad del campo gravitación en todos los puntos de la superficie de esa gran esfera imaginaria envolvente, no se obtendría el mismo valor en todos los puntos, o sea, que la intensidad del campo gravitación no es exactamente igual sobre un punto en el sur del océano Pacifico que sobre un punto en el continente africano, aun cuando ambos puntos de medición estén a la misma altura sobre el nivel del mar. Mas aún, la tierra no es una esfera perfecta, sino que esta achatada en sus polos, y el circulo ecuatorial no es en realidad un circulo, sino una eclipse, aunque de muy poca excentricidad; el eje mayor de esta es 150 metros más largo que el eje menor. Para que se tuviese una uniformidad esférica del campo gravitación de la tierra, en primer lugar esta debería de ser una esfera perfecta, y además su masa tendría que estar mezclada homogéneamente; ambas cosas son, por supuesto, imposibles dada la manera en que se formo y a que gira sobre su propio eje.

La no uniformidad del campo gravitacional de la tierra, combinada con el hecho de que la estructura del satélite tampoco tiene una masa homogénea, puesto que sus componentes están fabricados con una diversidad de materiales, produce un par gravitacional. Este par o fuerza hace que el satélite gire alrededor de su centro de masa y que su velocidad varíe conforme se desplaza sobre su órbita; dicho cambio

de velocidad o aceleración provoca a su vez que el satélite cambie de posición en longitud, es decir que se mueva a la derecha o al izquierda (oeste o este) sobre el arco geoestacionario, dentro de la caja imaginaria de la figura 3.1.

El campo gravitacional de la tierra es la fuerza de mayor influencia sobre la posición y orientación del satélite, debido al gran tamaño que tiene el planeta y a la relativa cercanía del satélite al mismo, pero la luna también ejerce una ligera fuerza gravitacional perturbadora. Sin embargo como esta última es mucho más pequeña que la tierra y además se encuentra diez veces más lejos del satélite que este de la superficie del planeta, su efecto comparativo es mínimo, al igual que en el caso de la fuerza gravitacional perturbadora del sol.

De cualquier manera, la combinación de esas fuerzas produce un movimiento del satélite perpendicular al plano ecuatorial, es decir, hacia arriba o hacia abajo (norte o sur) dentro de la caja imaginaria de la figura 3.1; esto origina una inclinación de su plano orbital de operación con respecto al plano ecuatorial en el idóneamente debería permanecer. Tal inclinación indeseable entre ambos planos es del orden de 1^a por año, medido hacia el plano de la eclíptica, un 30% de esta inclinación se debe al efecto del sol y un 70% al de la luna. Dicha atracción combinada de la luna y del sol produce además una pequeña variación en la posición longitudinal del satélite, aunque no es tan importante como la causada por el campo gravitacional de la tierra. Otra fuerza que también produce cambios en la posición y orientación del satélite es la presión de la radiación solar sobre la superficie de su estructura. Esta fuerza acelera al satélite, y su efecto es mayor en satélites que tienen sus arreglos solares montados sobre paneles desplegados o extensibles que sobre satélites de configuración cilíndrica, puesto que en el primer caso la superficie total expuesta a la presión de la radiación solar es mucho mayor, el principal efecto de esta fuerza es cambiar la excentricidad de la órbita del satélite, y como la resultante no incide directamente sobre su centro de masa, al mismo tiempo se produce un giro, que cambia su orientación con respecto a la superficie del planeta.

