

Capítulo 1

Introducción

Como introducción se presentan conceptos básicos de las telecomunicaciones vía satélite y se plantea la situación actual de este ramo.

1.1 Importancia del uso de satélites

Los satélites han sido desarrollados y mejorados por décadas con el avance de la exploración del espacio, uno de los progresos más importantes de la humanidad. Tienen diferentes aplicaciones además de telecomunicaciones y convergen diferentes áreas de ingeniería en su diseño.

Las aplicaciones principales de los satélites de comunicaciones son la radiodifusión o *broadcasting*, es decir, comunicación masiva y de cobertura extensa, y el acceso a telecomunicaciones de zonas remotas sin necesidad de usar múltiples repetidores terrestres. Son aplicaciones que sólo los enlaces vía satélite (enlaces satelitales) realizan, esto quiere decir que el satélite es un repetidor, recibe y transmite señales electromagnéticas cuya posición espacial tiene ciertas ventajas, aunque existan otras tecnologías de transporte, como lo es la fibra óptica, las comunicaciones vía satélite son un sistema único y complementario.

Las telecomunicaciones sigue en crecimiento a nivel mundial; entonces las comunicaciones vía satélite, económicamente, es un sector rentable y uno de los pilares de las telecomunicaciones, siendo definido como una vía general de comunicación. Además, existen sistemas de seguridad, de transporte terrestre, marítimo y aéreo entre otros que dependen de los satélites, su uso es esencial para las actividades humanas.

Datos de la COFETEL (Comisión Federal de Telecomunicaciones) revelan que el sector de las telecomunicaciones continúa en crecimiento, y respecto a servicios vía satélite se tiene que¹:

- ✓ El mercado de televisión restringida vía satélite ha crecido en mayor medida que los usuarios de televisión por cable.
- ✓ La provisión satelital tuvo un repunte debido a la demanda de servicios de voz, datos y televisión.

Los servicios de telecomunicaciones definidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) para el caso de uso de satélites incluyen: servicios

¹ COFETEL, 2010.

fijos (*Fixed Satellite Service: FSS*), móviles (*Mobile Satellite Service MSS*), de radiodeterminación (*Radiodetermination Satellite Service, RSS*), difusión (*Broadcasting Satellite Service, BSS*) y servicios diversos como operaciones espaciales (*Space Operation Service, SOS*), meteorología, radioastronomía (*Space Operation Service, SRS*) y de aficionados (*Amateur Satellite Service, ASS*).

Para satélites de radiodifusión, se tienen parámetros definidos como bandas de frecuencias y posiciones orbitales, es decir, es un recurso finito y que necesita ser regulado. Respecto al uso de frecuencias se tiene una saturación del espectro electromagnético por lo que son necesarias nuevas formas para evadir interferencia y aprovechar el costoso ancho de banda asignado o concesionado. Las posiciones para el caso de órbita geoestacionaria son lugares en el espacio que cumplen determinada condición, el tamaño de la órbita limita la cantidad de satélites.

Con el fin de aprovechar al máximo estos recursos, se necesita optimizar los sistemas, esto es posible con uso de modelos matemáticos o experimentales que implementados en herramientas de cómputo, software, ayuden al diseño de satélites de mayor eficiencia.

1.2 El satélite

1.2.1 Definición

En términos generales se tiene que: un satélite es “un cuerpo que gira alrededor de otro cuerpo de masa preponderante cuyo movimiento esta determinado principalmente, y de modo permanente, por la fuerza de atracción de este último”². El cuerpo de masa preponderante es el planeta Tierra que tiene un satélite natural que es la Luna; el ser humano ha puesto en órbita satélites artificiales cuya trayectoria se conoce como órbita.

Un satélite de comunicaciones es un satélite artificial y es un dispositivo que el ser humano ha creado para ser puesto en órbita en el espacio y establecer comunicación entre estaciones terrenas. En general, los satélites se componen de una carga útil y una plataforma. La carga útil es la parte que realiza la acción por la que fue fabricado el satélite y la plataforma es la estructura que mantiene funcionando al satélite.

² Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT

Para lograr colocar objetos en el espacio se requieren de lanzadores o cohetes, dispositivos que necesitan oponerse al campo gravitatorio del planeta y lograr, con precisión, su colocación en la órbita deseada.

Lo que determina el tiempo de vida de un satélite es el combustible, ya que no se puede recargar debido a la distancia en que se encuentran.

El satélite en un sistema de comunicaciones tiene una posición después del transmisor y antes del receptor, es decir, es un repetidor del mensaje original, aunque a algunos satélites pueden procesar la información.

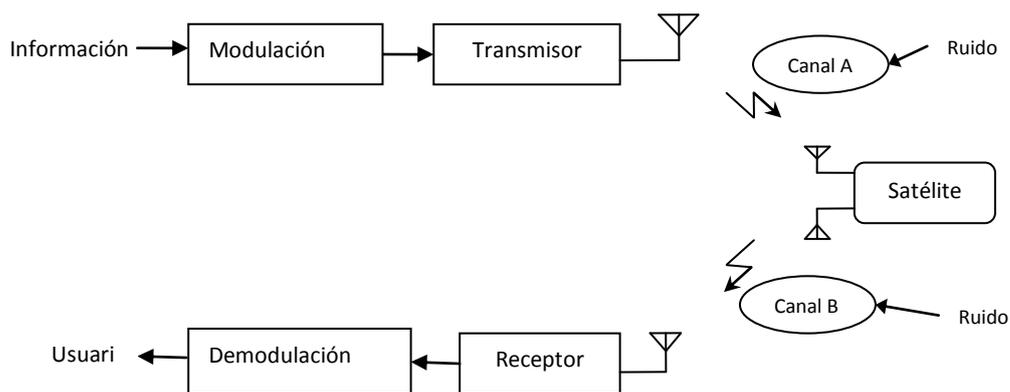


Figura 1.1 El satélite en el sistema de comunicación.

El bloque correspondiente al satélite incluye un arreglo de transpondedores para cambiar de frecuencia portadora. Para satélites regenerativos, se procesa la información en banda base.

1.2.2 Sistema de comunicación vía satélite

El sistema de comunicación vía satélite se compone básicamente de una estación A en la superficie de la Tierra, la cual va a hacer un enlace con el satélite X, en esta estación se genera la aplicación o información del proveedor del servicio. El satélite X, por otro lado, formará un enlace con otra estación B, en otro punto de la Tierra, la cual recibe y hace uso de la aplicación, además, se puede formar un enlace con el satélite Y.

Una estación terrena es el lugar o instalación en la Tierra que transmite o recibe señales del satélite, es decir la fuente o el destino de la información. El

enlace es la transmisión o recepción por medio de ondas radioeléctricas a través del medio, aire o vacío.

Esto es un típico esquema de repetidor, es decir, recibe y retransmite donde se distinguen dos segmentos: el segmento espacial está compuesto por los satélites, posición orbital, las instalaciones encargadas de mantener en posición, controlar y monitorear al satélite y sus subsistemas, administrar la red el tráfico y bandas de frecuencia; el segmento terrestre es donde están los dispositivos terminales o estaciones terrenas conectadas a alguna red terrestre de telecomunicaciones.

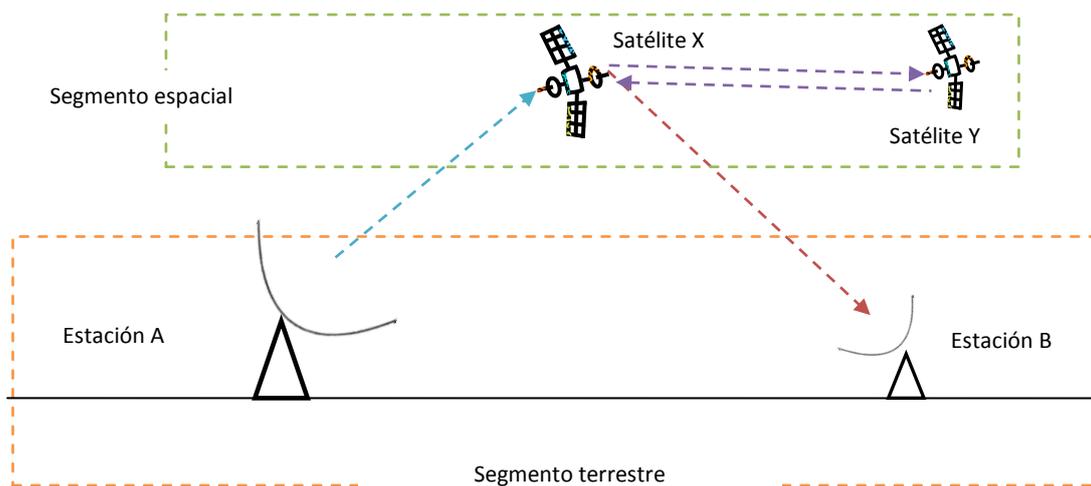


Figura 1.2 Sistema de comunicación vía satélite.

Estos segmentos se conectan a través de enlaces de comunicación, un enlace de subida o ascendente es aquel que proviene de la estación terrena hacia el satélite, un enlace de bajada o descendente es aquel que viene del satélite a la estación terrena. Además existen enlaces entre satélites, es decir, de un satélite a otro.

Los sistemas de telecomunicaciones por satélite pueden ser caracterizados por parámetros físicos de los que depende su construcción, configuración y sobre todo el costo. Estos parámetros son esencialmente determinados por las antenas, en el satélite y en la estación terrena. Es una tecnología cara por lo que su diseño debe ser adecuado y preciso para obtener los beneficios y ganancias esperadas.

El diseño de un sistema de comunicaciones por satélite contiene los siguientes pasos³:

³ Larson, 2005.

- Identificar los requerimientos de comunicaciones, es decir las fuentes y destinos de información, usuarios y locaciones, tasa de datos, retraso de transmisión, tiempo de acceso, disponibilidad y fiabilidad.
- Especificar arquitecturas de comunicaciones alternativas: identificar los enlaces y locación de las estaciones terrenas, considerar satélites y estaciones redundantes.
- Determinar tasas de datos para cada enlace: muestreo, cuantificación, especificar bits por muestra.
- Diseñar y cuantificar cada enlace, evaluar alternativas y comparar.
 - Elegir banda de frecuencias.
 - Seleccionar modulación y codificación.
 - Aplicar valores del tamaño de antena y el ancho de haz.
 - Estimar efectos de propagación, niveles de ruido e interferencia.
 - Calcular los valores requeridos de ganancia y potencia del transmisor.
- Clasificar el sistema de comunicación.
 - Seleccionar una configuración para la antena.
 - Calcular tamaño y masa de antena, potencia y masa del transmisor.

Un sistema con una constelación de satélites, varias estaciones terrenas asociadas establecen una red de comunicación por satélite. Los sistemas pueden ser muy complejos ya que las especificaciones y necesidades varían.

1.2.3 Clasificación

Los satélites se pueden clasificar por su órbita, tamaño y aplicación, de tal forma que existen satélites que no son de comunicaciones por lo que se delimitará el tipo de satélite que se analizará en esta tesis.

La forma de la órbita puede ser elíptica o circular (de altura constante), de inclinación polar, ecuatorial o inclinada.

Debido a la existencia de cinturones de alta radiación (acumulación de partículas provenientes del Sol), llamados Van Allen, donde los dispositivos electrónicos ni los seres vivos deben permanecer, se clasifican dos alturas:

LEO (*Low Earth Orbit*). De órbita baja con altura de 700 a 1 500 km⁴, por debajo de los cinturones Van Allen. Su tiempo en dar una vuelta completa o periodo es menor al de un día (24 horas) debido a la gran velocidad que requieren para mantenerse en órbita, denominada también órbita subsíncrona.

⁴ UIT: <http://www.itu.int/newsarchive/wtpf96/fact.html>

Existen aplicaciones en esta órbita para comunicaciones móviles, se tiene poco retardo, permiten portabilidad y se tienen enlaces más cortos, menos pérdidas. Sin embargo se requiere de constelaciones para una cobertura constante en una zona, ya que la huella del satélite se va trasladando.

MEO (*Medium Earth Orbit*). Satélites de órbita media tienen altura de 2 000 a 35 786 km o usualmente colocados a 10 000 km⁵, se encuentran entre los cinturones de Van Allen. Estos satélites pueden ser subsíncronos o semisíncrona (periodo de 12 horas). Se usan para telefonía móvil, sin embargo, su uso principal es para el Sistema de Posicionamiento Global, GPS, o aplicaciones meteorológicas.

Debido al movimiento relativo entre satélites, LEO y MEO, y las estaciones terrenas se presentan efectos negativos como lo es el efecto Doppler.

Además se tienen:

GSO (*Geosynchronous Earth Orbit*). Satélites de órbita geosíncrona a una altura de 35 800 km (35 786 o simplemente 36 000 km).

GEO (*Geostationary Earth Orbit*) Los satélites de la órbita geoestacionaria tienen una altura de 35 786 km y periodo de 24 horas. Estos satélites son un caso particular de la órbita geosíncrona porque además de tener esa propiedad, su órbita es circular y contenida en el plano ecuatorial por lo que desde la Tierra parece estar fijo en un punto, esto quiere decir que las antenas de las estaciones terrenas no tienen que rastrear al satélite y permanecen fijas teniendo una cobertura amplia, pero no completa para lugares cercanos a los polos (latitudes mayores a 70° Norte o Sur). Son los más populares para telecomunicaciones y tienen la vida útil más larga. El número de satélites está limitado a determinado número de posiciones o *slots* en la órbita. Algunas desventajas son: la interferencia entre satélites; el retraso o latencia es considerable (retraso de subida y bajada), por ejemplo en una estación ubicada en una latitud media la latencia es de 260 ms; las pérdidas de propagación en el espacio libre son considerables.

HEO (*Highly Elliptical Orbit*). Satélites con órbita altamente elíptica, inclinada y periodo semisíncrono o geosíncrono. Por ejemplo los satélites MOLNYA, su punto más alejado de la Tierra o apogeo es de 39 900 km, mientras que su punto más cercano a la Tierra o perigeo es de 500 km. Este tipo de satélites dan cobertura a las zonas de los polos.

⁵ Ibídem

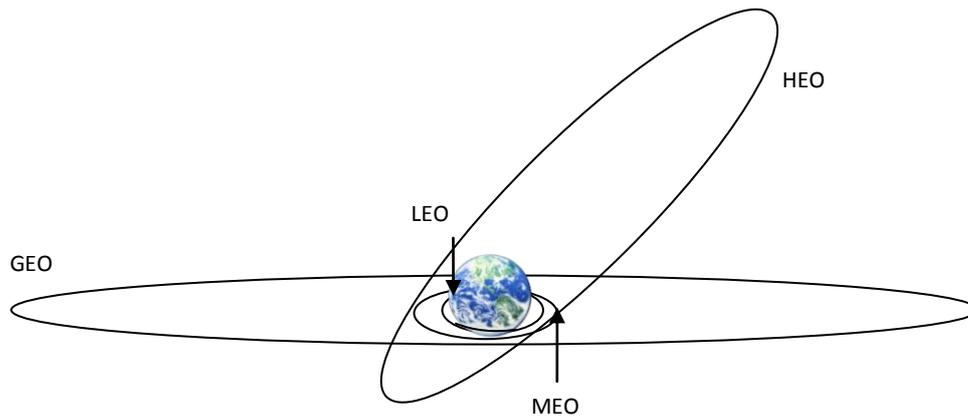


Figura 1.3 Esquema ilustrativo de tipo de órbitas.

En resumen se distinguen órbitas no geostacionarias como LEO, MEO y HEO, y órbita geostacionaria GEO. Orbitas circulares LEO, MEO y GEO y elíptica HEO.

Clasificación por su tamaño que es proporcional a la masa:

- Pico satélites con una masa menor a 1 kg.
- Nano satélites de masa de entre 1 y 10 kg.
- Micro satélites de 10 a 100 kg de masa.
- Mini satélites de 100 a 500 kg.

La utilización de satélites pequeños permite monitorear las condiciones del espacio, mejorar la tecnología de otros satélites, algunas aplicaciones de comunicaciones y tienen un costo menor de fabricación y de lanzamiento, precisamente debido a su tamaño, además permite la formación de constelaciones. La nanotecnología se puede ver que es una tendencia en otras ramas y para los satélites también se pueden presentar ventajas, sin embargo hay limitantes como el uso de potencia y combustible.

- Satélites medianos de 500 kg a 1 Ton.
- Macro satélites con masa mayor a 1 Tonelada

Existe una relación entre el tamaño del satélite y el costo.

Los satélites pueden tener las siguientes aplicaciones:

- ✓ Comunicaciones: difusión de TV, voz y datos.
- ✓ Meteorológicas: monitoreo del clima, estudios atmosféricos.
- ✓ Militares: reconocimiento espionaje, servicios para el gobierno, posicionamiento.
- ✓ Navegación: canales de seguridad.

- ✓ Exploración de la Tierra: cartografía.
- ✓ Científicas: prueba de nuevas tecnologías, estaciones espaciales, astronomía.

Para esta tesis, el análisis se centra en los satélites de comunicaciones, aunque hay usos en otras órbitas que requieren constelaciones, en esta tesis se enfocará al caso de un satélite GEO.

1.2.4 Subsistemas

El satélite se encuentra conformado por subsistemas o entidades especializadas para dar soporte al funcionamiento. Deben estar interconectadas y estar diseñados contra posibles daños. A continuación se enlistan y describen.

Subsistema de comunicaciones.

Como se definió antes, la carga útil o *payload* es la parte esencial del satélite, es la razón por la cual el satélite es llevado al espacio y está destinada a realizar la aplicación, es decir, de recibir señales electromagnéticas y repetirlas hacia la Tierra, pueden encontrarse más de una carga útil.

A este subsistema lo componen las antenas y los transpondedores. La antena es el elemento que debe radiar de manera eficiente la energía electromagnética y sus parámetros definen muchos parámetros de cobertura y aplicaciones que se detallarán más adelante. El transpondedor, o transmisor respondedor, es un arreglo de amplificadores que cambian de portadora y establece el canal de comunicación. Primero recibe y amplifica la señal en una banda, después cambia de banda para el enlace de bajada. Algunos satélites procesan la información, es decir, la información en banda base puede ser direccionada, corregir errores y posiblemente cambiar modulación.

El tipo de amplificador utilizado es un dispositivo de microondas llamado TWT, *Traveling Wave Tube*, o Lámpara de Onda Progresiva, el cual funciona en banda ancha y da hasta cientos de watts en la salida.

Tabla 0.1 Frecuencias del transpondedor.

Banda	Frecuencia de subida [GHz]	Frecuencia de bajada [GHz]
C	6	4

Ku	14	12
Ka	30	20

Como se ve en la Tabla 1.1 el transpondedor cambia la portadora a una frecuencia menor. La razón de esto es que para aislar y evitar interferencias e intercambiar elementos electrónicos, además el modelo de propagación describe que a mayores frecuencias se tienen mayores pérdidas, y como la potencia del satélite es limitada conviene que el enlace de bajada sea en una portadora menor que la de subida: $f_{subida} > f_{bajada}$.

En la plataforma del satélite se tienen los siguientes subsistemas que se encargan de dar soporte a la carga útil.

Subsistema eléctrico.

Es el encargado de proveer, almacenar, regular y suministrar de manera eficiente la energía eléctrica en forma de corriente directa, la potencia necesaria con estabilidad de voltaje. Está conformado por paneles solares que transforman la energía solar a energía eléctrica, baterías, cargador regulador de baterías, conductores, fuentes conmutadas. Constituye entre el 10 y 20% del peso total del satélite. Para satélites GEO se debe tomar en cuenta la existencia de eclipses, por lo que se debe suplantar los paneles solares por baterías.

Subsistema de rastreo, telemetría y comando (TTC).

Es la parte que da las instrucciones al satélite para controlar los parámetros que modifican el estado del satélite. Está formado por sensores y un equipo de telecomunicaciones independiente de la aplicación del satélite, en este caso se usan antenas omnidireccionales para recibir señales de cualquier parte.

Subsistema térmico.

Dadas las condiciones térmicas extremas del espacio y los puntos de operación de los equipos electrónicos, se necesita controlar la temperatura manteniendo los equipos operables ya sea disipando energía térmica o generándola. Hay dos formas para lograrlo: de manera pasiva con uso de reflejantes y tubos de calor y de manera activa con uso de anticongelantes o resistencias.

Subsistema estructural.

Es lo que mantiene a los demás subsistemas en una posición fija mediante resistencia física, sobre todo en el lanzamiento el cual puede tener movimiento

turbulento y alterar algún dispositivo y en la órbita, además evitar contracciones o dilataciones. Se conoce como chasis a la estructura que cumple esta función.

Subsistema de propulsión.

Provee incrementos de velocidad para mantener la posición orbital y dar estabilidad, corregir orientación y posibles cambios orbitales. La estabilización se da por giro o triaxial, bajo el principio de funcionamiento del giroscopio. Se obtiene propulsión mediante ruedas inerciales y agentes químicos o eléctricos que generan iones. También se usan imanes y la fuerza de gravedad de la Tierra.

Subsistema de posición y orientación.

Mantiene y determina la posición y orientación del satélite además de las antenas y paneles de celdas solares.

El objetivo en el diseño de los subsistemas de la plataforma es obtener la masa mínima, mínimo consumo de energía y alta fiabilidad de acuerdo a los requerimientos de la carga útil, los efectos del ambiente espacial y su rendimiento en el lanzamiento. Es común usar redundancia de subsistemas en los satélites, es decir, tener un repuesto en caso de fallas. Además una computadora principal, es la parte “inteligente”, que coordina las acciones de los subsistemas, procesa, almacena y formatea datos.

1.2.5 Bandas de frecuencia

El dominio de la frecuencia, o parte del espectro electromagnético, donde operan las comunicaciones satelitales son determinadas en principio por condiciones físicas que después deben ser reguladas por organizaciones internacionales o gubernamentales.

No toda la radiación se propaga por la atmósfera debido a la ionización, en ciertas gamas de frecuencias es posible que las ondas penetren a la superficie terrestre. De acuerdo a condiciones electromagnéticas, la ionosfera tiene propiedades de material conductor en un determinado ancho de banda actuando como un repetidor natural a frecuencias menores de 30 [MHz]. Sin embargo las condiciones de la ionósfera como repetidor depende de fenómenos naturales, lo que provoca enlaces poco confiables y con muchas pérdidas. Entonces para evitar el efecto reflector de la ionosfera se usan frecuencias más altas que penetran la ionosfera, donde hay una ventana radioeléctrica por arriba de los 100 [MHz] y debajo de los 60 [GHz], además se evitan efectos como birrefringencia (doble refracción) y girofrecuencia

(frecuencia de rotación). En frecuencias superiores son posibles los enlaces entre satélites.

Se denomina microondas una banda de frecuencias que ocupan de 300 [MHz] a 300 [GHz]. La clasificación utilizada se denomina con letras:

Tabla 0.2 Sub bandas de microondas utilizadas por satélites GEO.

Nombre	Frecuencia de subida/bajada [GHz]
L	1.6 / 1.5
S	2 / 2.2 2.6 / 2.5
C	6 / 4
X	8 / 7
Ku	14 / 12-11 17/12
Ka	30 / 20
Q/V	50 – 40

Cuando se opera en la banda de microondas, quiere decir que los dispositivos como antenas, amplificadores, y otros dispositivos requieren un análisis especial ya que el tamaño de los dispositivos es comparable con la longitud de onda de operación y un análisis con las leyes de Kirchhoff no funcionará, se utilizan las ecuaciones de Maxwell y óptica geométrica.

Aplicaciones para la banda L se tienen aplicaciones móviles y sistemas geoestacionarios, servicios de difusión en banda S y Ku, la banda C se encuentra saturada por los primeros sistemas, la banda X se encuentra servicio de televisión satelital, banda Ku se encuentra en actual desarrollo así como banda Ka que se ha incrementado interés en ella debido al ancho de banda que puede abastecer. El ancho de banda de un transpondedor, usualmente, es de 36 [MHz] pero hay algunos de 72 [MHz] u otros valores.

Las señales en estas bandas tienen ancho de banda amplio, las antenas son altamente eficientes y directivas. Como desventajas se tiene una amplia atenuación por las pérdidas de espacio libre, coinciden con frecuencias de

resonancia de sustancias como el agua, 2.5 y 23 [GHz], provocando mayor atenuación.

La elección de la frecuencia de operación determina parámetros como tamaños de las antenas, niveles de potencia, tamaño, masa y complejidad del diseño en satélites y estaciones terrenas. Además se tiene que cumplir con los acuerdos establecidos por las entidades regulatorias.

La UIT es la entidad regulatoria internacional respecto a dos rubros esenciales: uso del espectro y las posiciones orbitales. La interferencia es el efecto de una señal en otra, afectando o imposibilitando la comunicación, esto pasa por el traslape de espectro de frecuencias por lo que se deben regular los niveles de potencia. Es por eso que se reservan frecuencias para algunos servicios, regiones o tecnologías.

Para el uso de bandas de frecuencias se han definido tres regiones, el continente americano se encuentra en la región 2, esto con el fin de tener compatibilidad electromagnética, es decir, no provocar ni recibir interferencia.

La COFETEL es la agencia regulatoria del país, mediante el Reglamento de Comunicación Vía Satélite se establecen los lineamientos para obtener concesiones o permisos para ofrecer servicios de provisión satelital. El procedimiento para utilizar una posición geoestacionaria lo establece la UIT.

1.3 Esta tesis

Muestra los conocimientos recibidos durante la formación universitaria y refleja estos conocimientos para dar sustento a la idea que se va demostrar. Esta idea es la comparación teórica y cuantificación de parámetros por medio del objetivo principal, el cual es, el uso de software para aplicaciones de comunicaciones satelitales.

Se marca un antecedente con el uso de estos programas agregando un ANEXO, en idioma español, donde se explica el uso de los programas. Es por eso que esta tesis puede también ser utilizada para fines didácticos.

La estructura de esta tesis consiste en plantear la base teórica de las comunicaciones por satélite, ventajas y desventajas del uso de distintos haces por medio de una investigación bibliográfica y usar las herramientas de software para comprobar lo descrito en la teoría. Algunos temas serán mencionados sin ser profundizados, como las técnicas de acceso al medio, modulaciones, electrónica, la mecánica para las órbitas y lanzamientos.

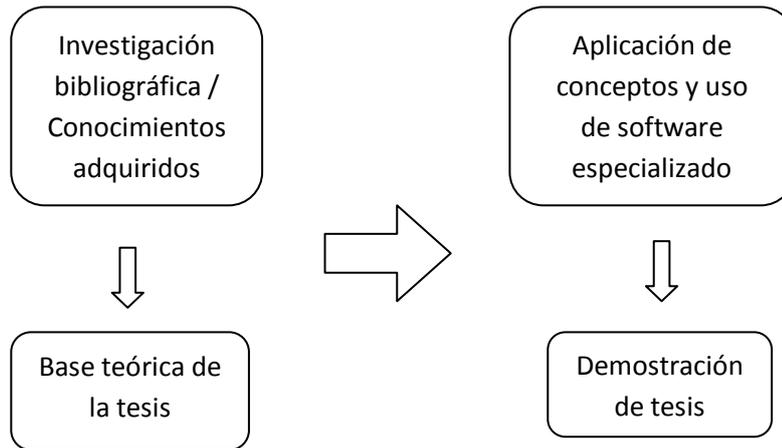


Figura 1.4 Desarrollo de la tesis.

La tesis centra su descripción teórica en los parámetros de las antenas, ya que son parte fundamental del sistema satelital y repercute en aspectos tan importantes como lo es el costo del sistema de comunicación vía satélite.

La tesis se delimita en:

- Uso de los programas *Satellite Tool Kit* y *Satsoft*.
- Uso de satélites GEO ya que son los principales para telecomunicaciones.
- Uso en las bandas Ku o Ka.
- Se abordará el caso de un satélite, el uso de constelaciones se limita a su mención.
- Los parámetros incluidos que se abordan son los correspondientes a las antenas del satélite que determinan el tipo de haz y a su vez las dimensiones de las antenas en las estaciones terrenas.

Con los resultados obtenidos se tendrá en cuenta la relación de tamaño, complejidad de diseño y el costo.

Un antecedente es el proyecto experimental de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) denominado ACTS (*Advanced Communications Technology Satellite*) donde se presenta la utilización de posición geoestacionaria, múltiples haces en banda Ka, procesamiento a bordo, altas tasas de información, cuyos resultados son provechosos para aplicaciones comerciales en un periodo de 80 meses de operación (1993-2000).