



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROPUESTA TÉCNICA DE UNA ESTACIÓN TERRENA (VHF/UHF)
PARA LA OPERACIÓN DE SATÉLITES EN ÓRBITA BAJA DESDE EL
LABORATORIO NACIONAL (CAT – FI – UNAM)

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A:

ESPERANZA GUERRA ZAMORA



DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ ALBERTO RAMÍREZ AGUILAR
MÉXICO D.F. JUNIO 2015

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que hicieron posible este trabajo por medio de su apoyo constante ya que sin él, este trabajo no habría sido posible.

A mis padres por estar siempre conmigo apoyándome en todo lo que hago y alentándome a continuar, a mis hermanos por creer en mí y ayudarme a lograr mis objetivos.

A mis amigos por estar siempre conmigo y motivándome a continuar aprendiendo cada día.

A la UNAM por brindarme la oportunidad de estudiar una licenciatura en esta casa de estudios y darme la posibilidad de aprender de los profesores.

A los sinodales, por el tiempo prestado y por las observaciones realizadas en este trabajo para su mejora.

A STK-AGI por la licencia de software y al convenio con la UNAM, ya que este software fue utilizado durante la realización de este trabajo en la parte de las simulaciones presentadas.

INDICE

LISTA DE TABLAS.....	vi
ACRÓNIMOS.....	vii
Capítulo 1:	1
<i>MARCO TEÓRICO</i>	1
1.1 Objetivo.....	2
1.2 Alcances de la Tesis	2
1.3 Estación terrena para seguimiento de satélites (TT&C).....	2
1.3.1 Elementos básicos de una estación terrena.....	5
1.3.1.1 Ganancia y Directividad de las antenas.....	9
1.3.1.2 Polarización de las antenas	10
1.3.1.3 Antenas omni-direccionales.....	11
1.3.1.4 Pre-Amplificadores para receptor.....	12
Capítulo 2	12
<i>SATÉLITES ARTIFICIALES QUE OPERAN EN ÓRBITA LEO.</i>	12
2.1 Satélites científicos, comerciales y de experimentación.....	13
2.1.1 Satélites de observación de la tierra.....	19
2.1.2 Satélites de navegación.....	20
2.1.3 Satélites para uso de Radio Aficionados (AMATEUR)	21
2.2 subsistemas de un satélite artificial operando en órbita LEO.....	21
2.2.1 Segmento terrestre	21
2.2.2 Subsistema eléctrico	22
2.2.3 Subsistema de control y estabilización	24
2.2.4 Subsistema de Telemetría, Seguimiento y Comando (TT&C)	25
2.2.5 Subsistema de Estructura y Control Térmico.....	28
2.2.6 Carga útil	29
Capítulo 3:	30
<i>SEGUIMIENTO DE SATÉLITES EN ÓRBITA LEO</i>	30
3.1 Elementos Básicos para el Seguimiento de Satélites	31
3.1.1 El Efecto Doppler.....	31
3.1.2 Elementos Orbitales	33
3.1.2.1 Epoch time	35
3.1.2.2 Eccentricity (excentricidad).....	37
3.1.2.4 Right Ascension of Ascending Node (Ascensión recta del nodo ascendente)	38
3.1.2.5 Orbital Inclination (Angulo de inclinación).....	39
3.1.2.6 Argument of Perigee (ARGP, Argumento de perigeo)	40
3.1.2.7 Mean Anomaly (Ángulo)	41
3.1.3 Ángulos de azimut y elevación.....	51

3.1.4 Huella de cobertura.....	55
3.1.5 Software de seguimiento para satélites LEO	60
Capítulo 4:	67
<i>NORMATIVIDAD Y REGULACIÓN DE FRECUENCIAS PARA OPERAR SATÉLITES LEO</i>	67
4.1 Organismos nacionales e internacionales.....	68
4.1.1 Organismo reguladores para la asignación de frecuencias (IARU, UIT).....	68
4.1.1.2 UIT-R.....	73
4.1.2 Organismos gubernamentales mexicanos encargados de la regulación y asignación de frecuencias (IFT - SCT)	75
4.1.2.1 Licencia para instalar y operar estaciones Radio Eléctricas (VHF/UHF).....	75
4.1.2.2 Obtención de certificado de radioaficionado en México.....	76
4.1.3 Asignación de frecuencias VHF/UHF (Región 2).....	80
4.1.4 Modos de operación comunes (Uplink-subida/Downlink-bajada)	83
Capítulo 5:	86
<i>DESARROLLO DE PROPUESTA DE LA ESTACIÓN TERRENA PARA LA OPERACIÓN DE SATÉLITES LEO</i>	86
5.1 Requerimientos y Necesidades Técnicas	87
5.2 Cálculos de Radio Enlace (Satélite - Tierra / Tierra - Satélite).....	92
5.2.1 Ecuaciones básicas para cálculos de enlace.....	93
5.2.2 Pérdidas en el espacio libre.....	95
5.2.3 Pérdidas por apuntamiento	98
5.2.4 Cálculo de ruido en una antena del enlace satelital	98
5.2.5 La línea de transmisión.....	101
5.2.6 Balance de potencia	102
5.2.7 Cálculo del SNR del enlace de bajada.....	103
5.3 Selección de equipo para la estación terrena	106
5.3.1 Subsistema de antenas tipo Yagi para las bandas VHF/UHF.....	106
5.3.2 Trans-Receptor para operar en las bandas VHF/UHF	108
5.3.3 Rotores para mover a las antenas.....	109
5.3.4 Unidad de control manual y remoto (Azimut / Elevación)	110
5.3.5 Torre y aparta rayos	111
5.4 Selección y cotización de equipo.....	114
5.5 Propuesta técnica final de estación terrena.....	114
5.6 Simulación de los pases de un satélite sobre Querétaro con STK	116
CONCLUSIONES	122
TRABAJO A FUTURO	124
Anexos.....	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Primer satélite artificial de la tierra “Sputnik 1”	3
Figura 1-2 Primer satélite artificial puesto en órbita por USA “Explorer 1”	4
Figura 1-3 Satélite artificial “Explorer 1” y centro de control (NASA)	5
Figura 1-4 Diagrama a bloques de una estación terrena en general	5
Figura 1-5 Antenas de Seguimiento, Telemetría y Comando (TT&C) (SATMEX_Eutelsat)	6
Figura 1-6 Antena de Seguimiento, Telemetría y Comando (GlobalStar)	6
Figura 1-7 a),b) Antenas de Seguimiento, Telemetría y Comando tipo Yagi (VHF/UHF)	7
Figura 1-8 Antena tipo Yagi con reflector y directores (VHF/UHF)	9
Figura 1-9 Ganancia y directividad de una antena	9
Figura 1-10 Polarización Lineal y Circular en Antenas.....	10
Figura 1-11 a),b) Patrón de radiación omnidireccional a) Caso ideal de radiación b) caso aproximado a la realidad.....	11
Figura 2-1 Representación de la fuerza Centrípeta y Centrifuga	13
Figura 2-2 Representación de la fuerza de atracción entre dos masas	14
Figura 2-3 Representación de la fuerza gravitacional	15
Figura 2-4 Representación de las diferentes tipos de orbitas.....	15
Figura 2-5 Satélites Teledesic	16
Figura 2-6 Distancia entre tierra y órbita LEO y GEO	17
Figura 2-7 Sistema de acceso Skybridge.....	18
Figura 2-8 satélite PICARD	19
Figura 2-9 Satélite GOCE	19
Figura 2-10 Estación terrena de apoyo para control y monitoreo satelital	22
Figura 2-11 Paneles Solares Plegados	23
Figura 2-12 Satélite con paneles solares desplegados.....	23
Figura 2-13 Banco de baterías para satélite	23
Figura 2-14 Propulsor de iones para satélite.....	24
Figura 2-15 Propulsor satelital (NASA)	24
Figura 2-16 Estación de control satelital	26
Figura 2-17 Tarjeta de Telemetría a bordo del satélite.....	26
Figura 2-18 Transmisor satelital en UHF	27
Figura 2-19 Computadora de Abordo	27
Figura 2-20 Manta Térmica	28
Figura 2-21 Satélite cubierto con manta térmica.....	29
Figura 2-22 Sonda para medir electrones en la ionosfera	29
Figura 3-1 Christian Doppler	31
Figura 3-2 Representación del Efecto Doppler	32
Figura 3-3 Elementos para obtener la velocidad relativa [26]	32
Figura 3-4 Órbita Elíptica.....	33
Figura 3-5 Órbita de la Tierra	33
Figura 3-6 Ley de Áreas de Kepler	34
Figura 3-7 Elementos del Epoch time.....	35
Figura 3-8 Posición de la tierra dentro de una elipse.....	37
Figura 3-9 Excentricidad de algunas elipses	38
Figura 3-10 Representación del RAAN	39
Figura 3-11 Ángulo de inclinación	40
Figura 3-12 Argumento de perigeo	41

Figura 3-13 Mean anomaly	42
Figura 3-14 Estación Espacial Internacional (ISS)	48
Figura 3-15 Selección de la localidad del observador	49
Figura 3-16 Localidad seleccionada (Querétaro)	49
Figura 3-17 Selección del satélite ISS	50
Figura 3-18 a), b) Paso del satélite ISS durante el día	50
Figura 3-19 Posición del satélite actual en tiempo real	51
Figura 3-20 Datos obtenidos sobre los pases que realizará el satélite	51
Figura 3-21 a), b) y c) Ángulos azimut y elevación	53
Figura 3-22 Elementos para calcular el ángulo de elevación [26].....	53
Figura 3-23 Distancia “s”, entre la estación terrena y el SSP [26].....	56
Figura 3-24 Distancia máxima (C-SSP) para realizar enlace con el satélite [26]	57
Figura 3-25 Cobertura con satélites LEO	58
Figura 3-26 Grafica de distancia cubierta según la altura del satélite [26].....	59
Figura 3-27 Área de cobertura de los satélites Globalstar	59
Figura 3-28 Seguimiento satelital de forma manual	60
Figura 3-29 Herramienta MacDoppler	62
Figura 3-30 Pantalla de Nova for Windows	63
Figura 3-31 Software Orbitron	64
Figura 3-32 a), b) Instant Track para seguimiento de satélites (LEO)	65
Figura 3-33 Herramienta en línea de seguimiento de satélites (LEO).....	66
Figura 4-1 Símbolo de la IARU	68
Figura 4-2 a) Emblemas de las 3 regiones, b) Regiones definidas por la ITU-IARU.....	69
Figura 4-3 Logo de la página web oficial de la UIT	70
Figura 4-4 Algunos servicios satelitales.....	72
Figura 4-5 Antenas de una Estación terrena en funcionamiento	74
Figura 4-6 a),b) Certificado de aptitud para radioaficionado.....	76
Figura 4-7 Astronauta Norteamericana Susan J. Helmes, KC7NHZ (NASA)	77
Figura 4-8 Logo de la estación de Radio Aficionado a bordo de la (EEI)	77
Figura 5-1 Estación terrena básica operando a 9600 Baudios	88
Figura 5-2 Estación terrena básica operando a 1200 Baudios	89
Figura 5-3 Estación terrena actual para operar en VHF/UHF.....	90
Figura 5-4 Antena en torre para operar en VHF/UHF	92
Figura 5-5 Enlace satelital básico	93
Figura 5-6 Radiación en antena isotrópica y en antena directiva	94
Figura 5-7 Capas de la ionosfera y sus correspondientes alturas	96
Figura 5-8 Rotación Faraday.....	97
Figura 5-9 Caso ideal y real de apuntamiento de antenas [20]	98
Figura 5-10 Fuentes de ruido interactuando con una antena [20]	100
Figura 5-11 Tipos y composición de un cable coaxial	101
Figura 5-12 Características de cable coaxial RG214.....	102
Figura 5-13 Ganancia y pérdida dentro de un enlace	103
Figura 5-14 Antena modelo 2MXP20 y frecuencia 144 a 146 MHz.....	106
Figura 5-15 Antena modelo 436CP30 y frecuencia 432 a 440 MHz	107
Figura 5-16 Transceptor modelo TS-2000X	108
Figura 5-17 Tipos de Rotores Azimut / Elevación.....	109
Figura 5-18 Rotor YAESU G-5500 en azimut / elevación.....	110
Figura 5-19 Control del rotor en azimut y elevación	110

Figura 5-20 a),b) Especificaciones para la instalación de la antena [Remtronic].....	112
Figura 5-21 Tirantes de acero sujetos a una de las anclas	113
Figura 5-22 Elementos de la Estación Terrena Propuesta.....	115
Figura 5-23 Datos requeridos por el software (STK-AGI)	117
Figura 5-24 Vista de STK en 3D.....	117
Figura 5-25 Pases sobre el CAT en un día.....	118
Figura 5-26 Pases sobre en CAT durante una semana	118
Figura 5-27 Pases sobre el CAT durante un mes	119
Figura 5-28 Datos obtenidos con STK.....	120
Figura 5-29 Esquema de colaboración	121

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Días correspondientes al inicio de cada mes.....	36
Tabla 3.2 Formato (AMSAT) Satélite: ISS.....	47
Tabla 3.3 Formato (AMSAT) Satélite: Satélite AO-10.....	48
Tabla 4.1 Contribuciones Anuales UIT.....	71
Tabla 4.2 Características de los exámenes para radioaficionado.....	78
Tabla 4.3 Cantidad de preguntas de la guía de radioaficionado.....	79
Tabla 4.4 Asignación de frecuencias en VHF (2 Metros).....	81
Tabla 4.5 Asignación de frecuencias en UHF (70 cm).....	82
Tabla 4.6 Asignación de frecuencias UHF (13 cm).....	83
Tabla 4.7 Modos de operación [20].....	84
Tabla 4.8 Frecuencias para radio aficionados [SMAD].....	85
Tabla 5.1 Datos de satélite y Estación terrena.....	104
Tabla 5.2 Las características de la antena para VHF.....	107
Tabla 5.3 Las características de la antena para UHF.....	108
Tabla 5.4 Equipo propuesto.....	114
Tabla 5.5 Duracion de los pases en un día, una semana y un mes.....	119

ACRÓNIMOS

LEO	Low Earth Orbit
CONACyT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CAT	Centro de Alta Tecnología
VHF	Very High Frequency
UHF	Ultra High Frequency
TT&C	Tracking, Telemetry and Command
NASA	National Aeronautics and Space Administration
COMSAT	Communications Satellite Corporation
GOCE	Gravity Ocean Circulation Explorer
TIROS	Television Infra-Red Observation Satellite
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NORAD	North American Aerospace Defense Command
ISS	International Space Station
SSP	Subsatellite point
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
IARU	International Amateur Radio Union
SCT	Secretaría de comunicaciones y transportes
IFT	Instituto Federal de Telecomunicaciones

*“No hay riqueza que valga lo que vale la sabiduría;
no hay mejor piedra de toque que la cultura del espíritu
Y no hay gloria mayor que el estudio y la ciencia”*

Las mil y una noches, Noche 61, Anónimo.

Capítulo 1:

MARCO TEÓRICO

1.1 Objetivo

Elaborar una propuesta técnica para la implementación de una estación terrena para la operación de satélites en órbita baja (LEO- Low Earth Orbit) que operan en el rango de frecuencias de VHF/UHF. La estación se ubicará en el Laboratorio nacional (CONACyT) Centro de Alta Tecnología (CAT) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en Juriquilla en el estado de Querétaro.

Así mismo llevar a cabo los cálculos necesarios para sustentar la selección del equipo que formará parte de la estación terrena y realizar simulaciones con ayuda de software especializado para la visualización de los satélites en órbita LEO en línea de vista con la estación terrena.

Seleccionar y cotizar los equipos para el funcionamiento de la estación.

1.2 Alcances de la Tesis

Actualmente no existe una estación terrena en el Centro de Alta Tecnología en Querétaro, Juriquilla. (CAT-FI-UNAM) dedicada a la operación de satélites que se encuentran en órbita baja (LEO) los cuales emplean frecuencias dentro del espectro UHF/VHF.

En este momento el CAT, a través de la Facultad de Ingeniería de la UNAM está trabajando en el desarrollo de proyectos satelitales en cooperación internacional con otros países como la Federación Rusa y Estados Unidos, por lo que es necesario contar con la infraestructura mínima necesaria con la capacidad de realizar el seguimiento satelital y bajar la telemetría de servicio y carga útil así como el envío de comandos de dichos proyectos (CONDOR, QUETZAL, ULISES II, entre otros).

La propuesta de la estación terrena, será un punto de partida para la instalación, lo que nos ayuda a tener un mayor desarrollo dentro de la universidad para promover la participación de los alumnos y académicos en la operación de sistemas espaciales.

Esta propuesta de estación terrena, podría complementarse con la infraestructura existente en la Facultad de Ingeniería de la UNAM (Estación VHF/UHF en el edificio Valdés Vallejo de Ciudad Universitaria en el Distrito Federal). La estación trabajara con telemetría de satélites en órbita baja desde el Centro de Alta Tecnología en Juriquilla, Querétaro.

1.3 Estación terrena para seguimiento de satélites (TT&C)

El desarrollo y puesta en órbita del primer satélite artificial hecho por el hombre el Sputnik 1 el 4 de Octubre de 1957 por la Unión Soviética abrió las puertas a la era espacial y con ello también la necesidad contar con la infraestructura terrestre necesaria

Capítulo 1: MARCO TEÓRICO

para el seguimiento y la recepción de las señales de radio provenientes de dichos ingenios espaciales.

La telemetría (*medición a distancia*) que envió el Sputnik 1 fue monitoreada por operadores de Radio alrededor del mundo. La frecuencia de radio en la que mando la telemetría, fue en 20.005 y 40.002 MHz. Una representación del satélite Soviético Sputnik 1 se muestra en la Figura 1.1



Figura 1-1 Primer satélite artificial de la tierra "Sputnik 1"

Algo que pocos saben es que en México se pudo recibir la señal de RF del Sputnik 1. Estaciones terrenas de Radio aficionados mexicanos constataron que el satélite llevaba en su interior un transmisor de extraordinaria potencia. **No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones.** y de acuerdo con la clave Morse, las primeras transmisiones del satélite captadas fueron traducidas a estas palabras... "Estoy listo...estoy listo... estoy listo...". Así lo mencionó el Ing. Medina Peralta quien estaba pendiente de todos los comunicados que pudieran venir del espacio, por encargo del Comité Mexicano del Año Geofísico Internacional. La estación terrena que captó las señales del satélite Soviético se encontraba en Mérida Yucatán.

La primera estación terrena que se implementó fue muy diferente a las estaciones terrenas actuales. Dicha estación fue diseñada para la transmisión y recepción de información proveniente de una nave espacial sin embargo, esta fue utilizada únicamente para realizar el rastreo de un satélite. A esta función de seguimiento o rastreo y comando se le conoce como *Tracking, Telemetry and Command* - TT&C (Seguimiento, telemetría y comando).

Al igual que con el lanzamiento de los primeros satélites artificiales, Estados Unidos de América y La Unión Soviética, a mediados de los 50's introdujeron esta capacidad a sus respectivos programas espaciales. A finales de los 50's en California, se instaló una antena para TT&C del *Explorer 1*, primer satélite artificial lanzado por Estados Unidos, la estación tenía una longitud de 90 m.

Capítulo 1: MARCO TEÓRICO

La representación del Explorer 1 se muestra en la Figura 1.2.

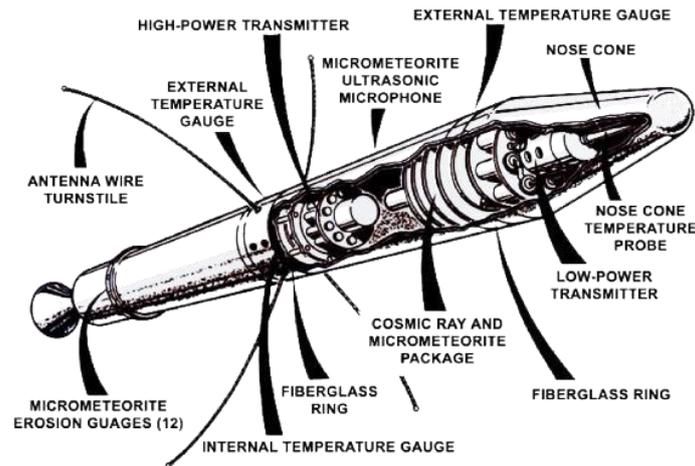


Figura 1-2 Primer satélite artificial puesto en órbita por USA "Explorer 1" [45]

Este periodo marco el comienzo de las telecomunicaciones por satélite, ya que después del lanzamiento del Explorer 1 y la instalación de la estación terrena para rastreo, se comenzaron a instalar una cantidad importante de estas para realizar algunos proyectos comenzando con el Jet Propulsion Laboratories (laboratorios de *Propulsión Espacial*) creadores del Explorer1, que se integraron a la National Aeronautics and Space Administration (NASA) como parte de un proyecto de red en el espacio.

El primer satélite repetidor activo fue el Telstar 1 de los Laboratorios Bell, con él se logró que Estados Unidos y Reino Unido tuvieran la capacidad de comunicarse en tiempo real TV y voz. El Telstar 1, fue un satélite posicionado en órbita baja (LEO-Low Earth Orbit), lo que demanda que la estación terrena incluya un sistema de rastreo.

Todas las estaciones construidas en este periodo, fueron altamente personalizadas para cumplir las necesidades de cada proyecto en investigación, esto quiere decir que aún no se tenía contemplado brindar un servicio de comunicaciones por satélite como sucedió años más tarde.

La figura 1.3 muestra una imagen real del Explorer 1 antes del lanzamiento y el centro de control como parte de la estación terrena de seguimiento y comando del satélite Norte Americano.



Figura 1-3 Satélite artificial "Explorer 1" y centro de control (NASA)

1.3.1 Elementos básicos de una estación terrena

Para poder operar una estación terrena, es indispensable contar con cierto equipo especializado, este puede ser desde el software requerido para el seguimiento satelital, Radio receptores (amplificadores de bajo nivel de ruido, convertidores de bajada, filtros, demoduladores) Radio transmisores (moduladores, convertidores de subida, amplificadores de potencia, codificadores), el mástil en el que se sostendrá la antena para recepción y transmisión de datos, etc. En la Fig. 1.4 se muestra un diagrama a bloques de una estación terrena.

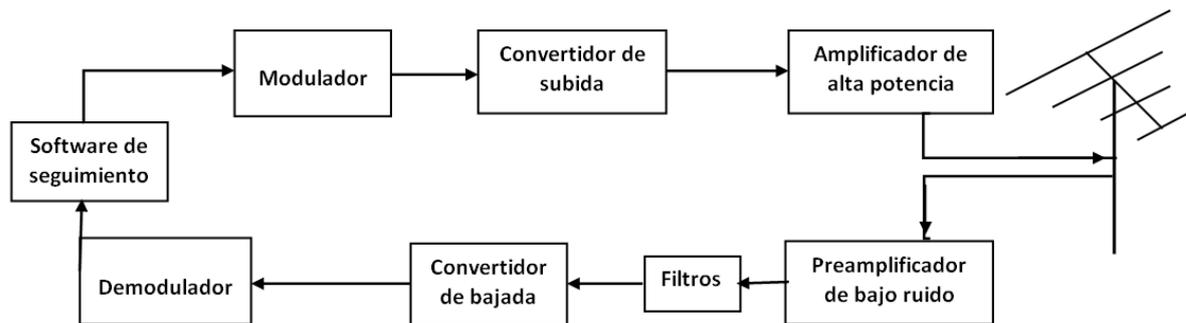


Figura 1-4 Diagrama a bloques de una estación terrena en general

La mayoría de las estaciones terrenas utilizadas para llevar a cabo maniobras en órbita desde tierra cuentan con antenas tipo (TT&C) con motores y/o rotores para llevar a cabo el seguimiento y envío de comandos al satélite. Ejemplos de antenas con estas características se muestran en las figuras 1.5 y 1.6.

Capítulo 1: MARCO TEÓRICO



Figura 1-5 Antenas de Seguimiento, Telemetría y Comando (TT&C) (SATMEX_Eutelsat)



Figura 1-6 Antena de Seguimiento, Telemetría y Comando (GlobalStar)

Como se puede ver, uno de los elementos más importantes que integran una estación terrena, es la antena ya que esta es la que nos permitirá enviar y recibir señales de Radio Frecuencia para obtener Telemetría (espacio – tierra) o mandar Comandos al satélite (tierra - espacio).

La frecuencia de operación de la antena, debe estar definida por el tipo de información y aplicación para la cual será utilizada. Dos de los rangos de frecuencias más utilizados

Capítulo 1: MARCO TEÓRICO

en la operación de satélites empleando antenas tipo Yagi son VHF (*Muy Alta Frecuencia*) y UHF (*Ultra Alta Frecuencia*), conocidas como la banda de 2.0 metros y 70 centímetros. En la Figura 1.7 se muestran ejemplos de antenas operando en dichas bandas.



(a)



b)

Figura 1-7 a),b) Antenas de Seguimiento, Telemetría y Comando tipo Yagi (VHF/UHF)

Las antenas, son uno de los elementos más importantes en la estación terrena ya que de estas dependerá la recepción de las señales enviadas desde el satélite como lo es la telemetría.

Capítulo 1: MARCO TEÓRICO

Al hacer referencia al sistema de antenas, no solo es a las antenas, sino también a todo el equipo necesario para su instalación y operación con esto nos referimos a los cables con los que será conectada hacia el interior del cuarto de control (que forma parte de la estación terrena), a los pre-amplificadores y los rotores que serán necesarios para la orientación de la antena considerando los ángulos de Azimut y Elevación.

Las antenas, dependen de la frecuencia a la cual se trabaje y es importante conocer esto porque si se elige una antena que no trabaje en los rangos de frecuencia necesarios para el enlace de subida y bajada, ocasionará que la estación terrena tenga antenas no útiles para realizar los enlaces.

Las antenas tipo yagi-uda son llamadas así por sus dos inventores el Dr. Shintaro Uda y el Dr. Hidetsugu Yagi, y han sido las antenas favoritas desde hace ya algunos años después de la segunda guerra mundial. Una antena tipo yagi, consiste de un dipolo, un reflector y uno o más elementos directores.

El orden de los elementos de las antenas tipo yagi, es: primero el reflector que va seguido del dipolo y finalmente los elementos directores. Las dimensiones del dipolo, dependen de la longitud de onda de las señales (λ) en las que va a trabajar la antena.

La longitud del reflector, es aproximadamente un cinco por ciento más grande que el dipolo, mientras que los elementos directores son un poco más pequeños que el dipolo y como se ha mencionado, van en la parte frontal del dipolo, estos elementos son los que nos ayudan a lograr que la radiación sea directiva y están direccionados a lo largo del eje perpendicular al dipolo.

Las configuraciones de las antenas yagi, pueden ser: horizontal y vertical. La antena va montada en un mástil y dependiendo del tipo de polarización que se desee, la antena debe ser orientada de distinta forma con respecto al plano de tierra.

Si se tienen dos antenas tipo yagi, montadas en el mismo mástil, y cada una de ellas tiene una polarización diferente, una vertical y la otra horizontal, podríamos con la correcta combinación de fase, obtener una onda con polarización circular. En la Figura 1.8 se muestra una antena tipo Yagi con reflector.

Capítulo 1: MARCO TEÓRICO

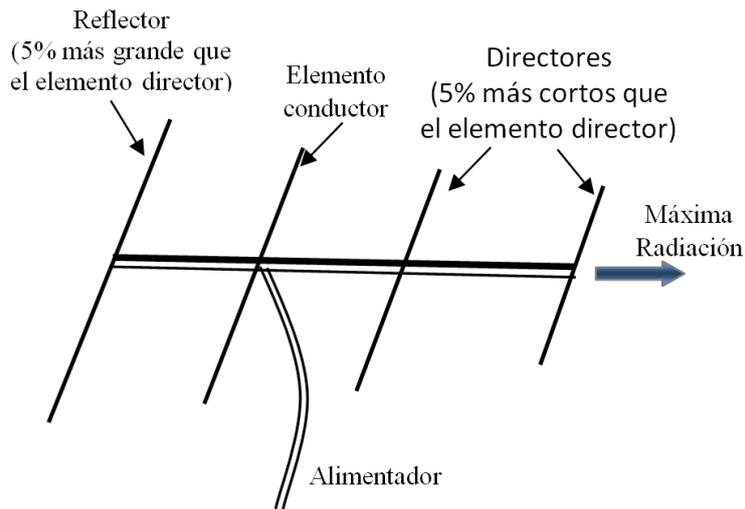


Figura 1-8 Antena tipo Yagi con reflector y directores (VHF/UHF)

1.3.1.1 Ganancia y Directividad de las antenas

La **ganancia**, es una propiedad de las antenas para incrementar el campo electromagnético de entrada con respecto a la salida de la antena, está estrechamente relacionada con la directividad y se expresa generalmente con decibeles [dB], estos pueden estar referidos a una antena estándar que puede ser un dipolo expresados como [dBd] o a una antena isotrópica como [dBi].

Entre mayor es la ganancia, mayor es la directividad de la antena. En la figura 1.9 se observa un patrón de radiación de una antena con lóbulos laterales y posteriores, además de indicar el punto en el que la señal disminuye 3 dB, que indican la mitad de la potencia radiada.

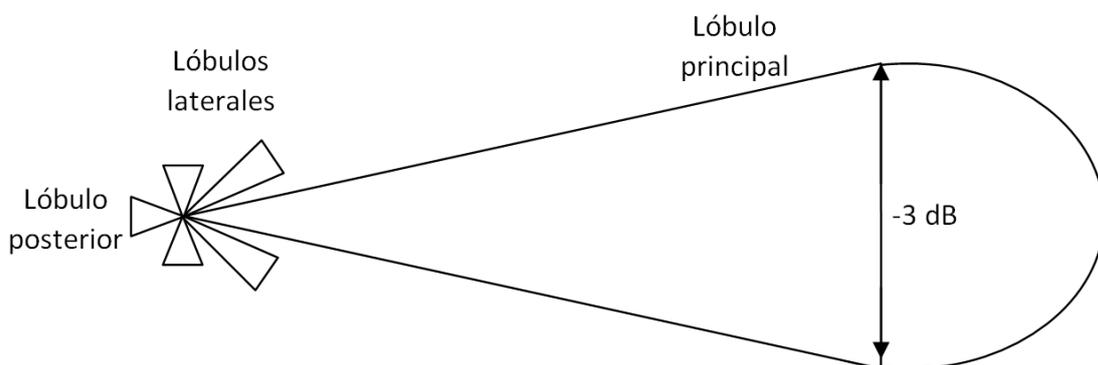


Figura 1-9 Ganancia y directividad de una antena

La **directividad**, consiste en que toda antena tiene la propiedad de radiar una intensidad de potencia distinta en cada dirección de la antena, lo que provoca que en algunas direcciones de la antena se radie con mayor intensidad.

El radiador isotrópico, es una antena ideal que solo puede existir en la teoría, y es utilizada como referencia en las mediciones debido a que es la máxima ganancia que podría obtenerse y se hace referencia a esta antena ya que las antenas reales, tendrán una ganancia menor.

Las antenas direccionales, tienen la ventaja de trabajar con una buena ganancia y directividad, lo que es de mucha ayuda al trabajar con señales débiles provenientes de un satélite ya que en esos casos se necesita una buena ganancia, para poder recuperar la información en la estación terrena.

1.3.1.2 Polarización de las antenas

La **polarización** de las antenas, es determinada por el elemento de radiación. Dependiendo de la posición del dipolo con respecto al plano de tierra, se puede obtener una polarización lineal horizontal o lineal vertical.

Si se coloca el elemento que radia paralelo al plano de tierra, la polarización que obtendremos será horizontal, mientras que si colocamos el radiador vertical, la polarización también será vertical. Si la posición del radiador es inclinada con respecto al plano de tierra, entonces tendremos que las ondas radiadas tienen las dos componentes horizontal y vertical, lo que nos genera una polarización circular.

La polarización circular, consiste en describir un camino rotacional alrededor del eje central. La polarización circular tiene la ventaja de que al usarla se obtiene una mejor recepción de señal. La figura 1.10 muestra la polarización Lineal y Circular respectivamente.

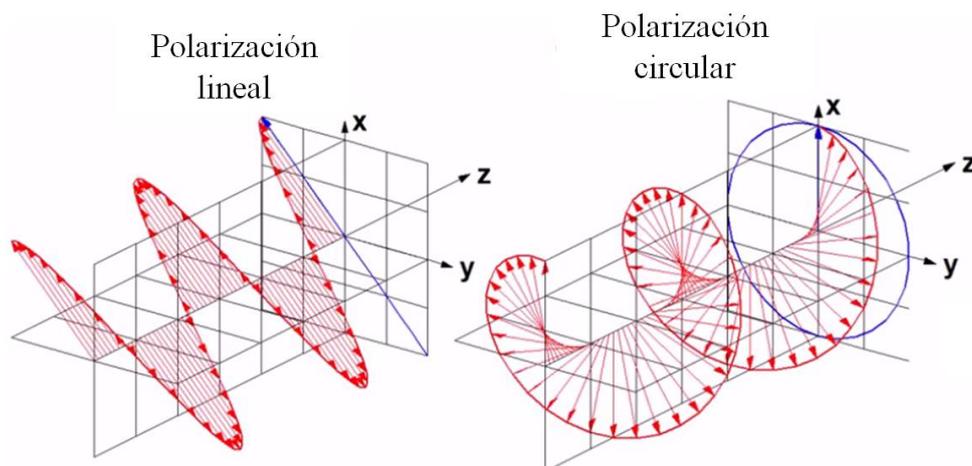


Figura 1-10 Polarización Lineal y Circular en Antenas [46]

1.3.1.3 Antenas omni-direccionales

Las antenas **omnidireccionales**, idealmente radian y reciben señales en todas las direcciones sin embargo, estas antenas en la realidad tienen un poco de directividad lo que significa que en ciertas direcciones de las antenas la radiación es un poco más intensa, esto se puede observar en el patrón de radiación al ver que su forma no es uniforme.

Las antenas omnidireccionales son utilizadas para trabajar con satélites de orbitas bajas ya que tienen sensibilidad y potencia de transmisión suficiente. Estas antenas son aun usadas debido a que no necesitan mecanismos de rotación y son más compactas. En la figura 1.11 se muestra el patrón de radiación en azimut de una antena de este tipo.

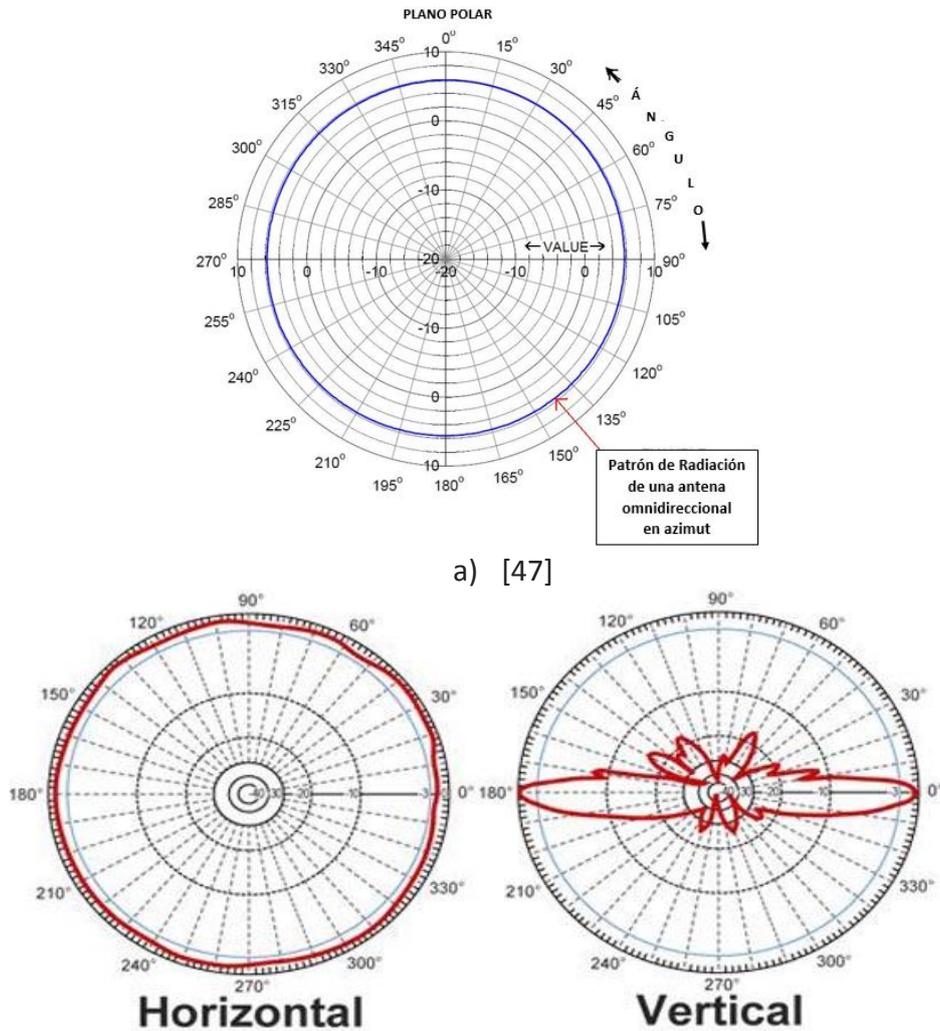


Figura 1-11 a),b) Patrón de radiación omnidireccional a) Caso ideal de radiación b) caso aproximado a la realidad [48]

1.3.1.4 Pre-Amplificadores para receptor

Los pre-amplificadores, son necesarios cuando se trabaja con señales que al ser enviadas por el satélite llegan a la antena muy débiles, existen varios factores que contribuyen a este efecto, esto puede ser desde utilizar una antena con poca ganancia o por el solo uso de los cables coaxiales, por la transmisión en el espacio libre, pues esto implica que existan pérdidas.

Capítulo 2

***SATÉLITES ARTIFICIALES QUE OPERAN EN
ÓRBITA LEO.***

2.1 Satélites científicos, comerciales y de experimentación

Los satélites artificiales, son objetos creados por el hombre y posteriormente con ayuda de un vehículo de lanzamiento son puestos en órbita para precisamente orbitar alrededor de la tierra o de algún otro cuerpo celeste para llevar a cabo su función para lo cual fue desarrollado.

La palabra satélite comenzó a ser utilizada a partir del 4 de octubre de 1957 con la puesta en órbita del Sputnik 1 el primer satélite artificial, la palabra satélite en idioma ruso es Sputnik (спутник). Después de este, varios satélites han sido puestos en órbita con aplicaciones que pueden ser: científicas, tecnológicas y militares. El movimiento de los satélites naturales y artificiales alrededor de la tierra es gobernado principalmente por dos fuerzas:

- **Fuerza centrípeta:** Es una fuerza dirigida al centro de la tierra debido a la fuerza de atracción gravitatoria de la tierra.
- **Fuerza centrífuga:** Es una fuerza que actúa hacia afuera del centro de la tierra. Esta es la fuerza ejercida durante el movimiento angular.

En el caso de un satélite artificial orbitando la tierra, el satélite ejerce una fuerza centrífuga, pero la fuerza que causa el movimiento angular es la fuerza centrípeta.

En ausencia de la fuerza centrípeta el satélite habría continuado moviéndose en una línea recta a una velocidad constante después de la inyección. Una representación gráfica de las fuerzas centrípeta y centrífuga se muestra en la figura 2.1

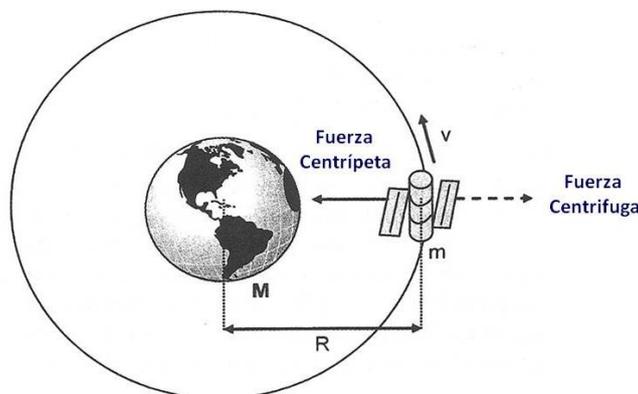


Figura 2-1 Representación de la fuerza Centrípeta y Centrífuga

Donde:

M = masa de la tierra

m = masa del satélite u objeto espacial

R = distancia entre la tierra y el satélite

v = vector velocidad

La fuerza centrípeta dirigida en ángulo recto con la velocidad del satélite hacia el centro de la tierra, transforma el *movimiento* en línea recta a uno *circular* o *elíptico* dependiendo de la velocidad del satélite. La fuerza centrípeta adicional, conduce a una aceleración correspondiente llamada aceleración centrípeta ya que causa un cambio en la dirección del vector de velocidad del satélite.

La fuerza centrífuga, es simplemente la fuerza de reacción ejercida por el satélite en una dirección opuesta a la de la fuerza centrípeta. (*3ª. Ley de Newton del movimiento*). La *única fuerza radial* que actúa sobre el satélite que está orbitando la tierra, es la fuerza centrípeta.

De acuerdo a la “**Ley de gravitación de Newton**” cada partícula independientemente de su masa atrae a todas las demás con una fuerza (F) gravitacional cuya magnitud...”es *directamente proporcional al producto de las masas de dos partículas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas*”. Con la ecuación 2.1 se puede obtener el valor de dicha fuerza.

$$F = G \frac{m_1 * m_2}{r^2} \quad \text{Ec. 2.1}$$

donde:

m_1 = masa de la tierra

m_2 = masa del satélite

$$\mu = Gm_1 = 3.986013 \times 10^5 \text{ Km}^3/\text{s}^2 = 3.986013 \times 10^{14} \text{ Nm}^2/\text{Kg}$$

La fuerza con la cual la partícula con masa m_1 atrae a la partícula con masa m_2 es igual a la fuerza con la cual la partícula con masa m_2 atrae a la partícula con masa m_1 y μ , es la constante gravitacional. En la figura 2.2 se muestra la dirección en la que actúan las fuerzas uno y dos.

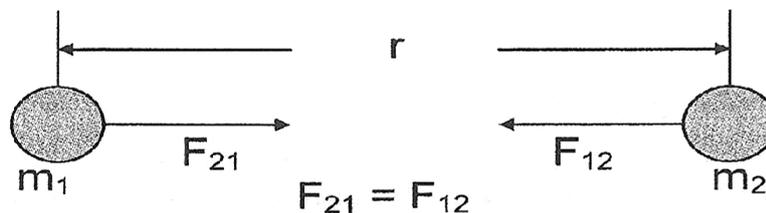


Figura 2-2 Representación de la fuerza de atracción entre dos masas

La *Ley de la gravitación de Newton* creció en importancia a medida que los científicos comprendieron su utilidad para predecir las *órbitas de los planetas* y otros cuerpos en el espacio.

Capítulo 2: SATÉLITES ARTIFICIALES QUE OPERAN EN ÓRBITA LEO

Por ejemplo, si la masa de la tierra (m_{Earth}) es 5.98×10^{24} kg y la masa de la luna (m_{Moon}) es 7.35×10^{22} kg. La distancia promedio entre la tierra es de: 3.84×10^8 metros y finalmente obtenemos la Fuerza Gravitacional. Una representación con vectores de esta fuerza se puede observar en la figura 2.3.

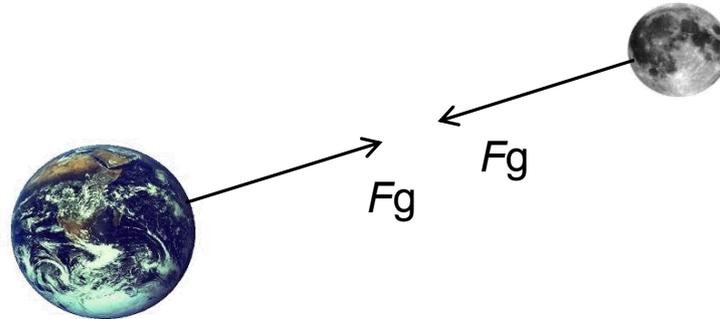


Figura 2-3 Representación de la fuerza gravitacional

$$F_g = \frac{Gm_{\text{Earth}}m_{\text{Moon}}}{R^2} \quad \text{Ec. 2.2}$$

$$F_g = \frac{\left(6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}\right) (5.98 \times 10^{24} \text{kg}) (7.35 \times 10^{22} \text{kg})}{(3.84 \times 10^8 \text{m})^2}$$

$$F_g = 1.98 \times 10^{20} \text{N} \text{ (o alrededor de } 4.46 \times 10^{19} \text{ lb}_f \text{)}$$

Por otro lado, el periodo del satélite, depende del tipo de órbita en el que sea colocado al mismo tiempo que la órbita depende de la aplicación para la que sea diseñado el satélite. Los tipos de órbitas son clasificadas como: órbitas bajas (LEO), órbitas medias (MEO) y geoestacionaria (GEO). Los tipos de órbitas son mostrados en la figura 2.4.

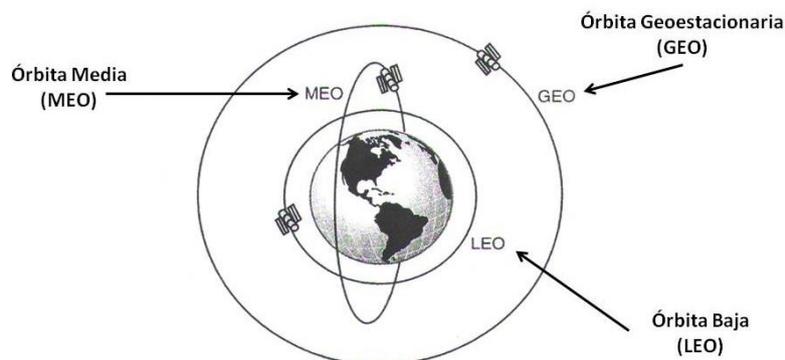


Figura 2-4 Representación de las diferentes tipos de órbitas

Los satélites que operan en órbitas bajas están a una distancia de entre 400 y 1500 km y con un ángulo de inclinación de entre 45° y 90° y finalmente su periodo está

Capítulo 2: SATÉLITES ARTIFICIALES QUE OPERAN EN ÓRBITA LEO

comprendido entre 90 minutos y 2 horas. Un ejemplo de satélites de órbita baja puede ser observado en la figura 2.5.

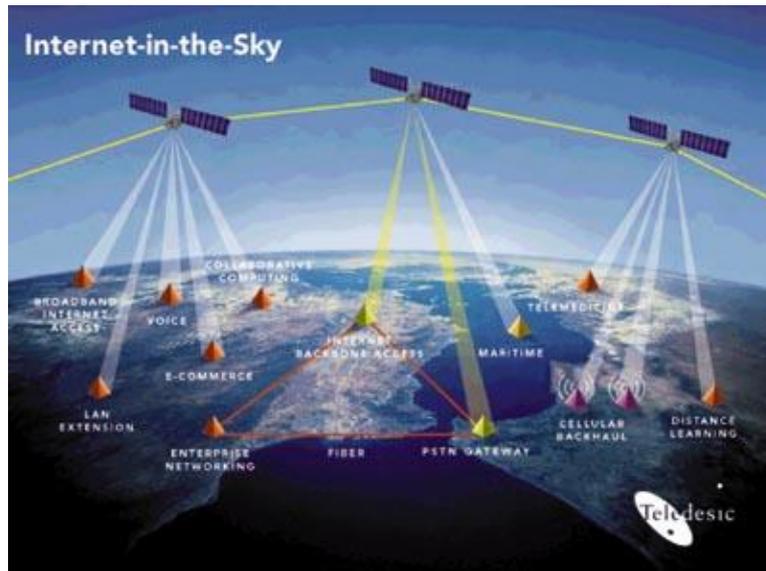


Figura 2-5 Satélites Teledesic

Algunas de las características de estos satélites, es que se necesitan varios satélites para tener cobertura global, es popular para las aplicaciones de comunicaciones móviles y requiere de una estación terrena para realizar el seguimiento del satélite. Estos satélites, también tienen la capacidad de cubrir áreas importantes como los polos los cuales no pueden ser cubiertos por satélites en órbita geoestacionaria (aproximadamente 36,000 Km de altura).

La mayoría de los satélites puestos en órbita baja, están dedicados a la comunicación y se utilizan principalmente para telefonía y transmisión de datos digitales además de imagen de televisión. Estos satélites debido a que son de orbitas bajas y pequeños, necesitan menos energía para colocarlos en órbita comparado con un satélite geoestacionario. En la figura 2.6 se muestra la distancia desde la tierra hacia una órbita LEO y una GEO.

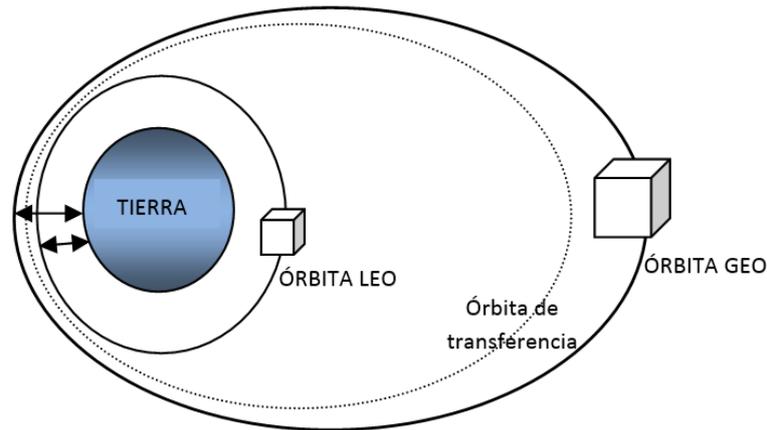


Figura 2-6 Distancia entre tierra y órbita LEO y GEO

La creación de COMSAT (Communications Satellite Corporation) y el lanzamiento en 1965, marcaron el comienzo de la comercialización de este medio de comunicación, esta compañía tenía en ese momento la mejor estación terrena con la capacidad de brindar el servicio de televisión y telefonía al público en general.

Las primeras transmisiones, fueron realizadas con la misma estación terrena construida para el Telstar, pero la capacidad del servicio era limitada y el objetivo, era mejorar la red de comunicación mundial lo que provocó una demanda de estaciones terrenas en muchas ciudades del mundo. COMSAT, trabajó en cooperación con AT&T, RCA y otras agencias alrededor del mundo para estandarizar el diseño y operación de las estaciones que serían utilizadas para esos servicios.

INTELSAT, se fundó a mediados de 1970 y comenzó a brindar servicios y a colocar algunos estándares que favorecían a las estaciones receptoras mejorando la calidad de recepción y disminuyendo el tamaño de las antenas con lo que logró llegar a brindar servicio doméstico de redes por satélite.

Estos servicios continúan hasta nuestros días, pues los satélites aun brindan servicios fijos de telecomunicaciones y radiodifusión de información, sin embargo el desarrollo de la nueva tecnología permitirá acceder a servicios interactivos de banda ancha con cobertura mundial lo que ocasionará una demanda de instalación de redes de estaciones terrenas para brindar dichos servicios. En los últimos años ha incrementado la propuesta de estos proyectos utilizando la tecnología satelital, algunas de las propuestas están basadas en satélites LEO (órbitas bajas).

Una constelación de estos satélites, tendría un número elevado de haces y un tiempo de propagación de la señal en el segmento espacial menor al que tendría un satélite geoestacionario por lo que este tipo de satélites son los apropiados para brindar

servicios interactivos con beneficios similares a las redes terrestres permitiendo el uso de los mismos protocolos de comunicación, las misma aplicaciones y estándares.

El sistema SkyBridge

ALCATEL es el promotor del sistema de comunicación de banda ancha SkyBribge utilizando una constelación de 64 satélites LEO, ofrece servicios como acceso a internet a alta velocidad y videoconferencias a usuarios profesionales y domésticos en todo el mundo que tendrán terminales de bajo costo. En el segmento terrestre cuenta con estaciones de control SOCC y TT&C (comunicaciones, navegación y vigilancia). [4]

El segmento espacial, proporciona cobertura mundial permanente. El segmento terrestre consta de las estaciones terrestres y de las terminales de usuario de satélite. Las prestaciones de este sistema son comparables a las que pueden proporcionar las líneas terrestres de banda ancha, su mercado está en zonas de baja densidad de población o donde se quiera desplegar un nuevo servicio con menos costo. [4]

Actualmente está brindando servicios satelitales a Ericsson, con La posibilidad de brindarle también servicio satelital para la operación de redes inalámbricas. En la figura 2.7 se muestra el sistema de acceso de Skybridge. [4][5]

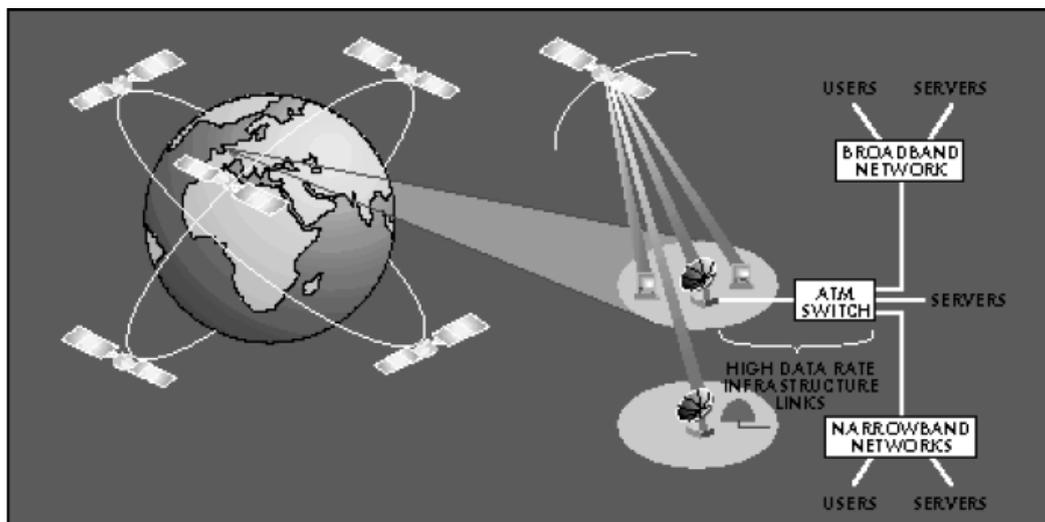


Figura 2-7 Sistema de acceso Skybridge [49]

El satélite científico PICARD, fue puesto en órbita en junio de 2010 por la agencia espacial francesa, su órbita era de 725 Km. Su misión, observar el funcionamiento del sol y la influencia con el clima de nuestro planeta. Este satélite lleva instrumentos especiales para medir la radiación total, para estudiar la capa de ozono y el comportamiento solar. En la figura 2.7 se muestra el satélite científico Picard.



Figura 2-8 Satélite PICARD [50]

2.1.1 Satélites de observación de la tierra

Estos satélites son una herramienta utilizada para el seguimiento y estudio de nuestro planeta, debido a que algunos están colocados en órbita baja, estos cuentan con una buena resolución. Debido a que son de orbitas bajas, pueden tardar alrededor de 100 minutos en dar una vuelta a la tierra lo que significa que pueden hacer un barrido de la tierra y proporcionar información de humedad a diferentes altitudes y con esa información determinar otros valores como la temperatura de la superficie.

El satélite GOCE (Gravity Ocean Circulation Explorer), fue el primero de una serie de satélites con la misión de promover la investigación de la atmosfera, la biosfera y la hidrosfera, para estudiar la humedad del suelo, la salinidad de los océanos y el espesor del hielo.

El GOCE, se lanzó y fue puesto en órbita baja en marzo de 2009 y hasta 2011 por la agencia espacial europea para el estudio del campo gravitatorio de la tierra y gracias a él se obtuvo mucha información muy valiosa acerca de la circulación oceánica y del cambio del nivel del mar debido al cambio climático. En la figura 2.9 se muestra este satélite.



Figura 2-9 Satélite GOCE [51]

Satélites meteorológicos

Los satélites TIROS (Television Infra-Red Observation Satellite) fueron los primero en ser específicamente meteorológicos. La importancia de estos satélites meteorológicos es la capacidad de visualizar la tierra junto con la atmosfera ya que están encargados de tomar fotografías para después rescatar la mayor información posible, estas imágenes se utilizan principalmente para visualizar nubes, vapor de agua y la temperatura de la tierra y del mar. Esto lo hacen durante los periodos de tiempo en los que hay luz visible y esa información es utilizada por las estaciones meteorológicas para predecir las condiciones atmosféricas.

“Los satélites meteorológicos constituyen el Subsistema espacial del Sistema Mundial de Observación y su principal objetivo es completar la información proporcionada por el Subsistema de Superficie de una forma económicamente viable. Se han convertido en una de las herramientas más prácticas que ha producido la tecnología espacial para la predicción del tiempo.”¹

Algunos satélites utilizados para esta actividad son los NOAA-14, NOAA-15 por Norte América y los METEOR 3-5 por Rusia, algunas de sus características más importantes son:

- Orbitan de polo a polo a una altura de entre 800 y 900 km
- En un día pasan dos veces por el mismo punto
- Al ser de órbita baja permiten alta resolución y tienen dos modos de operación.

Los satélites TIROS NOAA son operados por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), y algunos de los objetivos son: medir la temperatura, humedad atmosférica, temperatura de la superficie terrestre y de la superficie de los mares y contribuir al estudio de las partículas atómicas emitidas por el sol.

El satélite METEOR es ruso y operado por la Agencia Espacial Rusa - SRC. Su altitud es de cerca de 1.200 km y tienen como objetivo tomar medidas de la temperatura del agua y a varios niveles de la atmósfera, al igual que medir la intensidad de la radiación emitida por la Tierra y también puede proporcionar información sobre las nubes y la nieve.

2.1.2 Satélites de navegación

Los satélites de navegación son utilizados para localizar hielos o para trazar las corrientes oceánicas. Algunos ejemplos de satélites de órbita baja (LEO), son las constelaciones de Globalstar e Iridium.

1

<http://www.proteccioncivil.org/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum12/vdm031.htm#3103c>

2.1.3 Satélites para uso de Radio Aficionados (AMATEUR)

El primer satélite para radioaficionado fue el OSCAR 1, creado por un grupo de personas que se organizaron unos meses después del lanzamiento del Explorer 1. OSCAR es el acrónimo para Orbiting satellite Carrying Amateur Radio y esta organización está continuamente. Algunos satélites puestos en órbita son: OSCAR 2, OSCAR 3, AMSAT-OSCAR10 y continúan trabajando en más proyectos. [1]

En 1969, se creó un grupo de radioaficionados en Washington D.C. Llamado AMSAT y ha participado en proyectos satelitales en colaboración con Inglaterra, Alemania, Brasil y Argentina, en cada país la organización es independiente, sin embargo puede colaborar en proyectos internacionales. [1]

2.2 subsistemas de un satélite artificial operando en órbita LEO

Los subsistemas del satélite o segmento espacial, se refieren a los elementos que estarán a bordo del satélite, carga de servicio y carga útil. Este segmento podría ser clasificado en dos áreas, una que hace referencia a la estructura propia del satélite (BUS), subsistemas como:

- Eléctrico
- Control y estabilización
- Telemetría, Seguimiento y Comando
- Estructura y Control Térmico

La segunda área, sería la carga útil la parte encargada de proveer el servicio o cumplir la función principal del satélite, si mencionamos como ejemplo un satélite de comunicaciones, esta carga útil haría referencia a los transpondedores.

El subsistema de telemetría y comando, es utilizado para enviar información desde la estación terrena hacia el satélite (comando) y recepción de información del estado operativo del satélite (Telemetría). Es necesario realizar el seguimiento del satélite y para esto se debe conocer el ángulo de elevación y conocer la posición exacta después de que se coloca al satélite en órbita. El seguimiento se realizara para monitorear el funcionamiento de los equipos a bordo empleando sensores de temperatura, corriente, voltaje y presión además de verificar que las transmisiones cumplan con las características de frecuencia y potencia.

2.2.1 Segmento terrestre

El segmento terrestre, es utilizado para transmitir y recibir las señales enviadas desde los satélites y funciona como interface con la red en que opera en tierra. Cada estación terrena debe incluir un equipamiento como: Antenas de transmisión y recepción, estas

antenas están acompañadas normalmente de su propio equipo de rotores para el apuntamiento de la antena y rastreo del satélite. Dentro de la estación terrena el sistema de recepción debe tener buena sensibilidad para poder detectar las señales enviadas desde el satélite así como el sistema de transmisión debe transmitir con la potencia suficiente para que la señal sea correctamente recibida por el receptor del satélite. En la figura 2.10 se muestra un ejemplo de una estación terrena para control y monitoreo.



Figura 2-10 Estación terrena de apoyo para control y monitoreo satelital [52]

2.2.2 Subsistema eléctrico

El subsistema eléctrico es el encargado de proveer energía eléctrica a todos los componentes dentro del satélite para su correcto funcionamiento, esto lo hace con ayuda de celdas solares que captan toda la energía solar posible para después convertirla en energía eléctrica y los componentes electrónicos puedan utilizarla, con esa energía también se recargan baterías que son utilizadas durante el lanzamiento del satélite y en periodos de obscuridad como eclipses o en periodos de tiempo en los que las celdas del satélite no tienen la posibilidad de captar luz solar.

Los paneles solares, también dependen de la forma de la estructura del satélite por ejemplo si el satélite es de forma cilíndrica, los paneles solares probablemente estén alrededor de la estructura, mientras que con otra forma en la estructura, los paneles podrían ser de forma rectangular y ser desplegados después de la puesta en órbita del satélite.

En la figura 2.11 se muestra un ejemplo de paneles solares plegados y en la 2.12 un satélite con los paneles desplegados, cuando el satélite ya está en órbita y finalmente en la figura 2.13 se muestra un banco de baterías para satélite que son utilizados en periodos de sombra.

Capítulo 2: SATÉLITES ARTIFICIALES QUE OPERAN EN ÓRBITA LEO



Figura 2-11 Paneles Solares Plegados



Figura 2-12 Satélite con paneles solares desplegados [53]

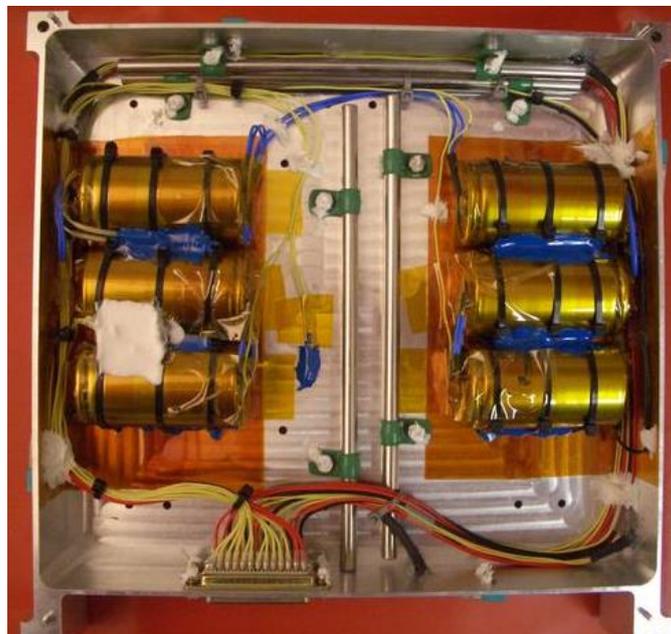


Figura 2-13 Banco de baterías para satélite

2.2.3 Subsistema de control y estabilización

La orientación del satélite, se refiere a la posición del satélite en el espacio con respecto a la tierra, tener un sistema dedicado a esto es necesario ya que las antenas generalmente deben estar apuntando hacia la tierra y existen fuerzas como las provocadas por la gravedad de la tierra el sol y la luna que interfieren con orientación del satélite y esto puede provocar errores de apuntamiento de las antenas ya que el satélite puede derivar hacia el este o al oeste en el plano longitudinal y hacia el norte o sur en latitud. [7]

La orientación es monitoreada por sensores que están referidos hacia el centro de la tierra, si ningún sensor detecta ninguna desviación en la orientación, se envían señales que indican que el posicionamiento es correcto, si no es así este control de orientación puede ser proporcionado por ruedas de momento, gas jets (chorro de gases, proveedor de gas) o propulsores de ion en los satélites de comunicaciones. En la figura 2.14 2.15 se observan, un propulsor de iones y un propulsor experimental.

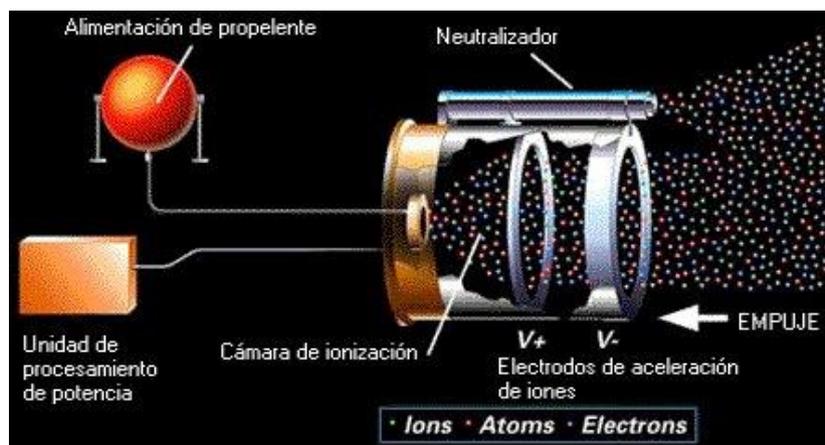


Figura 2-14 Propulsor de iones para satélite [54]

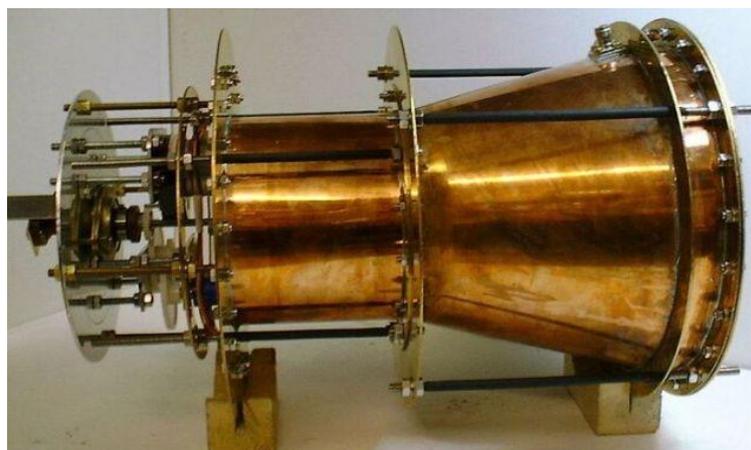


Figura 2-15 Propulsor satelital (NASA)

El control orbital, es el proceso de mantener al satélite en determinada posición orbital, esto se logra con los mismos propulsores que se utilizan para la orientación. Las

propiedades no esféricas de la tierra pueden provocar que el satélite derive lentamente a lo largo del plano ecuatorial los propulsores ejercen una fuerza que se opone a esta derivación y provocan que el satélite regrese a su posición orbital o a la posición deseada.

La derivación del satélite es inducida principalmente por la fuerza de gravedad del sol y la luna. Estas fuerzas causan un cambio de inclinación, por lo que es también necesario tener una compensación periódica de fuerzas en dirección norte, sur similar al realizado en dirección este, oeste.

El combustible que lleva a bordo el satélite con el cual se realizan las maniobras de control y posicionamiento en norte, sur, este y oeste, es un factor determinante en la vida útil del satélite, ya que al terminarse el combustible la vida del satélite también ha terminado aun cuando los componentes electrónicos del satélite aun funcionen correctamente.

2.2.4 Subsistema de Telemetría, Seguimiento y Comando (TT&C)

El subsistema de TT&C, proporciona información de control para mantener al satélite de forma segura en su órbita. Los enlaces de telemetría hacia tierra normalmente son separados de los enlaces de comunicaciones sin embargo, pueden trabajar en la misma frecuencia. Generalmente la telemetría se realiza en enlaces separados a los de comunicaciones y hacia estaciones terrenas especializadas debido a las características que se requieren en la estación para mantener en órbita a los satélites.

El subsistema de TT&C, comprende a las antenas, el receptor, el transmisor y algunos sensores, los datos de telemetría son enviados por el satélite hacia la estación terrena para que desde ahí se lleve un control de los subsistemas del satélite como; la carga útil, el eléctrico y control térmico, esto ocurre para controlar parámetros como el apuntamiento de la antena, el modo de operación de los transpondedores, uso de las baterías o los cambios en las celdas solares. [7]

En tierra el subsistema de telemetría rastreo y comando incluye a la antena, transmisores y receptores y un subsistema de rastreo. Acciones como el seguimiento con ayuda de un software es realizado de manera automática lo que quiere decir que la intervención humana es mínima.

El rastreo se refiere a la posición del satélite y al movimiento del satélite en órbita. El funcionamiento del rastreo consiste en enviar señales o balizas desde el satélite hacia una estación terrena y existe un fenómeno conocido como efecto Doppler que ocasiona un cambio en la frecuencia a la cual se envían las señales o balizas de TT&C este fenómeno se monitorea y se determina que cambios causa en la frecuencia de las señales enviadas.

Capítulo 2: SATÉLITES ARTIFICIALES QUE OPERAN EN ÓRBITA LEO

Para conocer la posición del satélite, se utilizan las mediciones de algunas terminales en tierra, estas terminales pueden conocer la posición por retardos en el tiempo de recepción de las señales enviadas por el satélite y con los sensores de velocidad y aceleración dentro del satélite se puede obtener información de los cambios en la posición orbital. En la figura 2.16 se muestra un centro de control satelital.



Figura 2-16 Estación de control satelital [55]

La telemetría es toda la información recabada con ayuda de los sensores a bordo del satélite y enviar esa información a tierra. Los datos de telemetría son información importante como voltaje y corriente en el subsistema de potencia y la información de temperatura de los subsistemas son los más importantes, estos mensajes de telemetría son enviados por canales con formato TDM (multiplexación por división de tiempo) y comando empleando el protocolo AX.25. En la figura 2.17 se muestra un ejemplo de una tarjeta de telemetría que va a bordo del satélite formando parte del sistema de telemetría así como en la figura 2.18 se muestra un transmisor en UHF utilizado para enviar la telemetría hacia la estación terrena.

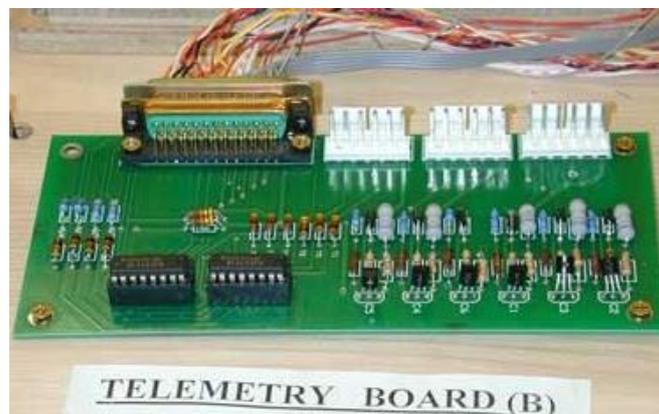


Figura 2-17 Tarjeta de Telemetría a bordo del satélite

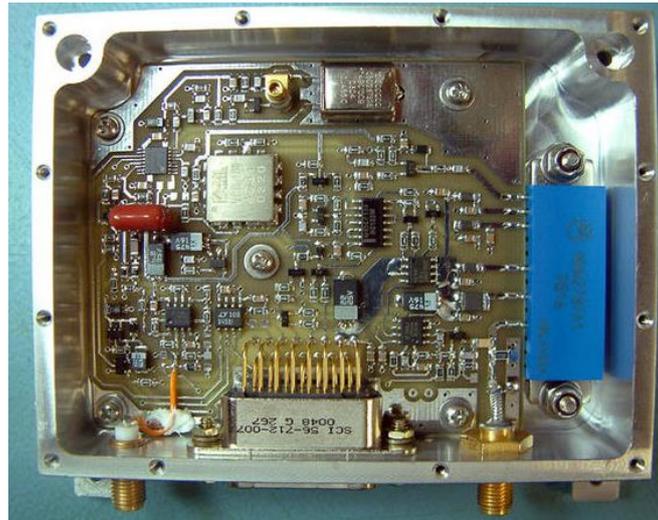


Figura 2-18 Transmisor satelital en UHF

Comando esta parte es un complemento del sistema TT&C y consiste en enviar información específica de comando hacia el satélite desde tierra, en ocasiones esta información es en respuesta a la información recibida de telemetría por ejemplo, cambio o corrección de órbita, apuntamiento de la antena, modos de operación de los transpondedores o algún tipo de control en el voltaje de las baterías. Esto es realizado por la computadora de a bordo que recibe la información para después ejecutar las indicaciones recibidas desde tierra. Una computadora de este tipo se puede observar en la figura 2.19



Figura 2-19 Computadora de Abordo

El sistema de comando se utiliza durante el lanzamiento y al colocarlo en órbita y para desplegar los paneles solares y las antenas por mencionar algunos ejemplos. Por seguridad del satélite, la información del satélite es enviada codificada y debido a que durante el lanzamiento y el cambio de órbita del satélite este aun no despliega su antena, los satélites trabajan con una antena omnidireccional en banda UHF, banda S o banda L, las cuales permiten trabajar bajo diversas circunstancias.

2.2.5 Subsistema de Estructura y Control Térmico

La estructura del satélite, es la parte encargada de soportar y proveer seguridad a los componentes del satélite como de impactos en el espacio o de cambios bruscos de temperatura. La forma de la estructura depende del método de estabilización que se empleará para el segmento espacial, los métodos que se utilizaban comúnmente eran la estabilización por giro y estabilización en tres ejes.

Los satélites en órbita experimentan grandes variaciones de temperatura en el espacio exterior, estas variaciones al igual que la radiación proveniente del sol deben ser controladas para no provocar daño a los componentes dentro del satélite. Los componentes del satélite también generan calor que debe ser también controlado en los satélites geoestacionarios. En los satélites de orbitas bajas la radiación por la que pueden ser afectados es por la reflejada por la tierra.

El control térmico es diseñado para estabilizar la temperatura ambiente del satélite y para esto existen técnicas como utilizar mantas o escudos térmicos estos son colocados en partes estratégicas en el satélite para proveer aislamiento. Para proteger los subsistemas electrónicos, se pueden colocar espejos de radiación y los calentadores térmicos pueden ser utilizados para mantener condiciones adecuadas de temperatura para algunos componentes como propulsores los cuales a bajas temperaturas podrían causar problemas. En la figura 2.20 se muestra una manta térmica para recubrimiento del satélite.



Figura 2-20 Manta Térmica [56]

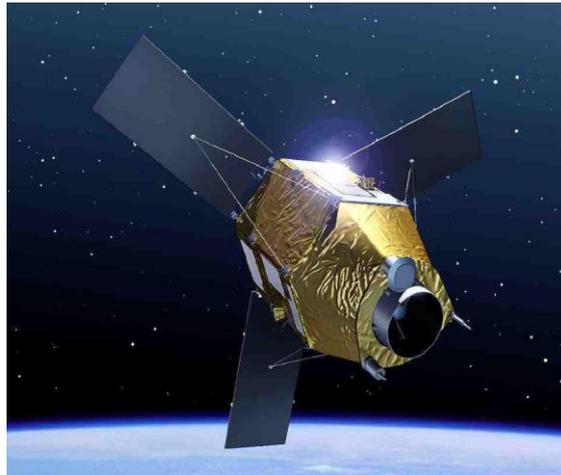


Figura 2-21 Satélite cubierto con manta térmica [57]

2.2.6 Carga útil

La carga útil, depende de la aplicación de cada satélite por ejemplo para un satélite de comunicaciones la carga útil sería el subsistema de antenas y el transpondedor. Dentro del sistema de antenas el dipolo es utilizado principalmente para la TT&C en VHF y UHF, ya que la telemetría es importante durante el proceso de lanzamiento y aun no son desplegadas las antenas del satélite, en la figura 2.22 se muestran unas sondas satelitales utilizadas para medir la densidad de electrones en la ionosfera.

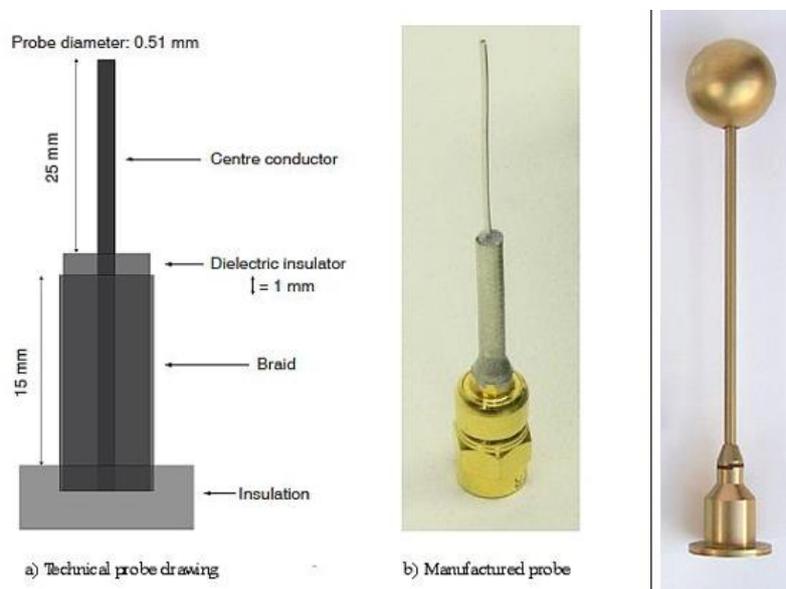


Figura 2-22 Sonda para medir electrones en la ionosfera

Capítulo 3:

SEGUIMIENTO DE SATÉLITES EN ÓRBITA LEO

3.1 Elementos Básicos para el Seguimiento de Satélites

3.1.1 El Efecto Doppler

Christian Doppler fue quien explicó por qué las ondas de sonido cambian de acuerdo a su propagación, alejándose o acercándose con respecto a quien las escucha. El efecto Doppler es un fenómeno en el que ocurre un desplazamiento en la frecuencia debido a que el transmisor se está moviendo con respecto al receptor, esto puede observarse en los enlaces con satélite de órbita baja en los cuales la frecuencia puede incrementarse o decrementarse lo cual depende de: si el satélite se acerca o aleja con respecto al seguimiento que realiza la antena. En la figura 3.1 se observa a Christian Doppler. [1]



Christian Doppler
(1803-1853)

Figura 3-1 Christian Doppler [58]

El cambio en la frecuencia ocasionado por el efecto Doppler, es proporcional a la velocidad relativa entre el transmisor y el receptor. Cuando el transmisor se está moviendo hacia el receptor, la frecuencia aumenta y cuando el transmisor se aleja del receptor, la frecuencia disminuye. La figura 3.2 es una representación del efecto Doppler y con la ecuación 3.1 es posible obtener el valor de la frecuencia Doppler si se conoce la frecuencia transmitida, y la velocidad relativa.

$$f_r = \left(1 + \frac{v_r}{c}\right) f_t \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde:

f_r = frecuencia recibida (frecuencia Doppler)

v_r = velocidad relativa

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

$f_t = \text{frecuencia transmitida}$

$$\Delta f = f_t \frac{v_r}{c} = f_r - f_t \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde:

$\Delta f = \text{desplazamiento Doppler}$

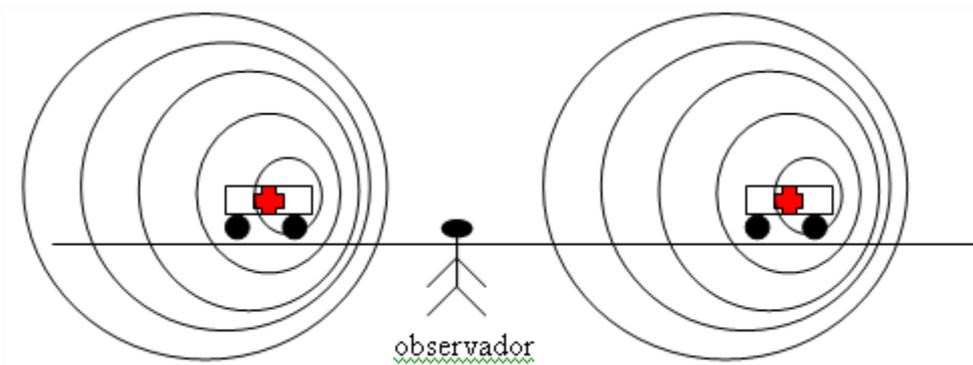


Figura 3-2 Representación del Efecto Doppler [59]

La velocidad relativa, observada por la estación terrena puede ser obtenida considerando la figura 3.3 y se expresa como la ecuación 3.3. [26]

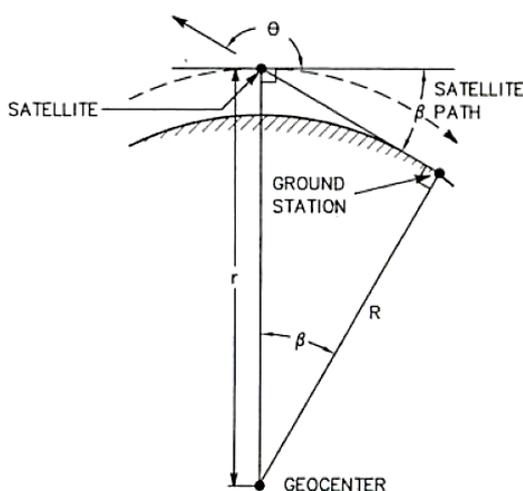


Figura 3-3 Elementos para obtener la velocidad relativa [26]

$$v_r = v \cos \theta = v \cos(180^\circ - \beta) = -v \cos(\beta) = v \frac{R}{r} \quad \text{Ec. 3.3}$$

donde:

$v_r = \text{velocidad relativa}$

$v = \text{velocidad en m/s}$

$R = \text{radio medio de la tierra, entre el geocentro y la estación terrena}$

$r = \text{distancia entre el geocentro y el satélite}$

3.1.2 Elementos Orbitales

Parámetros orbitales

El rastreo satelital realizado por una estación terrena, necesita realizar dos cálculos, el primero calcula la posición del satélite en su órbita y el segundo el paso del satélite sobre un punto de la tierra en un momento determinado. Para realizar estos cálculos, es necesario conocer primero los elementos orbitales o elementos keplerianos para conocer la posición en órbita y datos de posicionamiento terrestre como latitud, longitud y radio de la tierra en el caso del segundo cálculo. [6]

Para conocer la órbita de un satélite, es necesario conocer la similitud de este con la forma en la que la tierra y los planetas giran alrededor del sol y la luna alrededor de la tierra, además de comprender las fuerzas naturales que actúan sobre los cuerpos que están orbitando. A comienzos del siglo XVII Kepler descubrió algunas propiedades del movimiento de los planetas que son las llamadas leyes de Kepler. [1]

“Leyes de Kepler

- **Primera ley:** *La órbita de un planeta alrededor del Sol es una elipse con el Sol en uno de sus focos.*

Una representación de órbitaelíptica de un planeta, puede observarse en la figura 3.4.

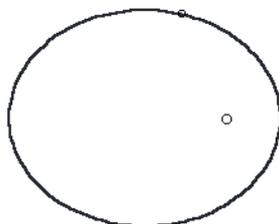


Figura 3-4 Órbita Elíptica [60]

Las órbitas de la mayor parte de los planetas del Sistema Solar son prácticamente circulares. En la siguiente figura 3.4 se muestra la forma de la órbita de la Tierra.

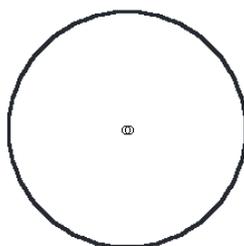


Figura 3-5 Órbita de la Tierra [60]

- **Segunda ley:** La línea que une al planeta con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales.

En la siguiente figura 3.5, las dos áreas sombreadas son iguales, así que el planeta tarda lo mismo en ir de A a B que en ir de C a D.

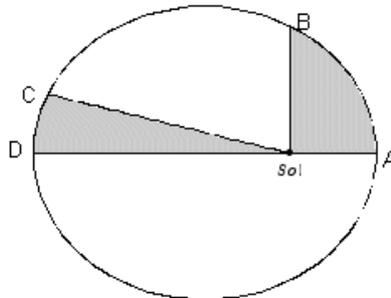


Figura 3-6 Ley de Áreas de Kepler [60]

- **Tercera ley:** El cuadrado del período de un planeta es proporcional al cubo de su distancia media al Sol (al cubo del semieje mayor de su órbita).

$$P^2 = kR^3$$

Esta ley relaciona el tiempo que tarda un planeta en dar la vuelta al Sol con su distancia media al Sol. Así que conociendo una de estas dos cantidades, es posible conocer la otra.”²

Los elementos Keplerianos, se definen como números que permiten calcular las órbitas de los satélites. En el esquema original se requieren 7 números para definir la órbita de un satélite.

A estos 7 números, se les conoce como elementos orbitales o "Keplerianos" (Johann Kepler [1571-1630]). Estos números definen una elipse, la orientan con respecto a la Tierra, y ubican al satélite en la elipse a un cierto tiempo determinado. En el modelo de Kepler, las órbitas satelitales son modelos de forma y orientación constantes [xx].

Tomando como referencia la Tierra y como base las leyes de Kepler, para definir la órbita y posición de un satélite utilizamos los siguientes parámetros orbitales:

² <http://puemac.matem.unam.mx/puemaco/kepler/html/index.html>

1. *Epochtime (tiempo)*
2. *Eccentricity (excentricidad)*
3. *Mean Motion (semi eje mayor)*
4. *Right Ascension of Ascending Node(Ascensión recta de unnodo ascendente)*
5. *Orbital Inclination (Angulo de inclinación)*
6. *Argument of Perigee (Argumento de perigeo)*
7. *Mean Anomaly (Anomalia verdadera)*

Con los datos anteriores, que serán explicados con detalle a continuación, es posible conocer la ubicación del satélite en la órbita y realizar predicciones en algún momento dado del lugar en el que se localizara el satélite.

3.1.2.1 Epoch time

Epoch time, es un número que especifica el momento en que fue tomada la muestra. Una muestra es el conjunto de datos de los elementos orbitales de un satélite en un tiempo determinado. Este número contiene dos partes, en la primer parte especifica en año con dos dígitos y el número de día del año con tres dígitos, mientras que en la segunda parte se especifica la hora del día. En el siguiente ejemplo se muestra como está compuesto el formato; YY, MM, DD/HH, MM.SS (año, mes, día/hora, minuto, segundo) [6][1]

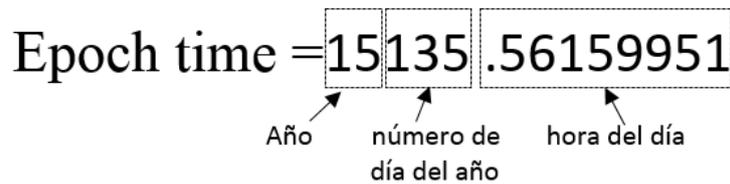


Figura 3-7 Elementos del Epoch time

La fecha se obtiene con ayuda de la tabla 3.1, observando en que mes, se encuentra el día del año. [26]

Tabla 3.1 Días correspondientes al inicio de cada mes [26]

Mes	Día de inicio del mes
Enero	0
Febrero	31
Marzo	59
Abril	90
Mayo	120
Junio	151
Julio	181
Agosto	212
Septiembre	243
Octubre	273
Noviembre	304
Diciembre	334

Si tomamos el número **135**, este valor es mayor al correspondiente al inicio del mes de mayo, lo que quiere decir que es en este mes, la diferencia entre el valor del Epoch time y el correspondiente en la tabla 1 es decir entre **135** y **120**, nos indica el día del mes. En este caso es el día **15** del mes de **mayo**.

La hora del día de obtiene tomando la fracción con punto decimal, primero se multiplica esa fracción por 24 horas, que corresponden a un día. La hora del día es la parte entera

$$.56159951 = (.56159951) * (24 \text{ horas}) = \mathbf{13.47838824} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Se obtiene, que fue a las 13 horas. Para obtener los minutos, tomamos la fracción resultante del cálculo anterior y se multiplica por 60, correspondientes a una hora.

$$.47838824 = (.47838824) * (60 \text{ minutos}) = \mathbf{28.7032944} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Se obtiene el valor de los minutos que fue en el minuto 28. Para encontrar los segundos, nuevamente tomamos la fracción del cálculo anterior y se multiplica por 60 segundos, correspondientes a un minuto.

$$.7032944 = (.7032944) * (60) = \mathbf{42.197664} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Se obtiene que fue con 42.19 segundos. Finalmente reuniendo los datos obtenemos el formato con día mes año y hora. Finalmente si pasamos los datos obtenidos a un formato común o estándar, tenemos que es:

15/05/2015 a las 13: 28: 42. 19

3.1.2.2 Eccentricity (excentricidad)

La **excentricidad**, es un parámetro adimensional entre 0 y 1. Este valor nos indica que tan circular es la órbita es decir que tan cerrada es una elipse, nos indica la relación entre el semieje mayor y el semi-eje menor de la órbita. Si la órbita es circular, el valor de la excentricidad es igual a cero y si la excentricidad es cercana a uno es una elipse muy larga y angosta. Con las ecuaciones 3.7 y 3.8 es posible obtener el valor de la excentricidad. Y en la figura 3.8 se muestran algunas distancias utilizadas en los cálculos. [1][6][7]

$$e = \frac{r_a - r_p}{r_a + r_p} \quad \text{Ec. 3.7}$$

donde:

e = excentricidad de la órbita

r_a = distancia entre el centro de la tierra y el apogeo

r_p = distancia entre el centro de la tierra y el perigeo

$$e^2 = 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 \rightarrow e = \sqrt{\left(1 - \frac{b}{a}\right)^2} \quad \text{Ec. 3.8}$$

donde:

e = excentricidad

a = semieje mayor

b = semieje menor

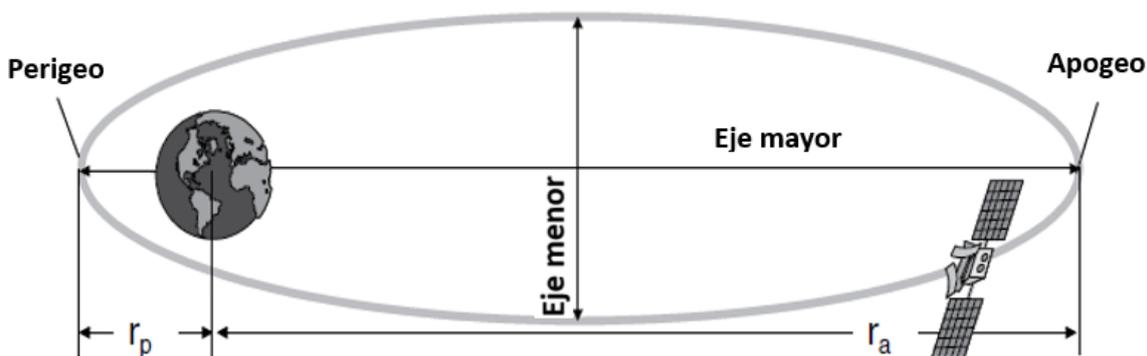


Figura 3-8 Posición de la tierra dentro de una elipse

Para la excentricidad, se tiene como caso especial cuando la elipse tiene el eje mayor y el eje menor del mismo tamaño, esto quiere decir que la órbita es circular y que el valor de la excentricidad es igual a cero, si la órbita es elíptica es valor de excentricidad debe

estar entre cero y uno. Sin embargo, los satélites de orbitas bajas tienen la característica de operar en orbitas circulares. La mayoría de los satélites son lanzados en la misma dirección de la rotación de la tierra para minimizar el uso de energía requerida para colocar en órbita a un satélite. En la figura 3.9 se muestran algunos valores de excentricidad.

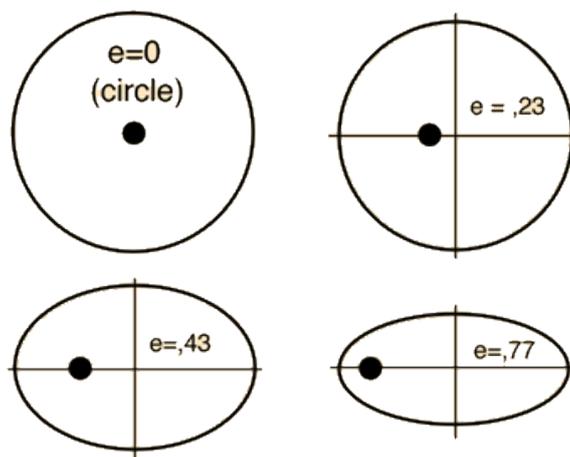


Figura 3-9 Excentricidad de algunas elipses [61]

El *semi-eje mayor*, es un número que nos indica cuantas vueltas o revoluciones realiza el satélite por día, por ejemplo de perigeo a perigeo dentro de un día solar es decir en 1440 minutos. Nos ayuda a conocer el tamaño de la elipse orbital. Si el satélite tiene órbita circular, viaja a una velocidad constante, sin embargo si su órbita no es circular el satélite se mueve más rápido en el perigeo y más lento en el apogeo. A la velocidad promedio resultante se le conoce como *mean motion* y la unidad que utilizan para medirla son las revoluciones por día, donde revolución es el tiempo que tarda en dar una vuelta a la órbita tomando como referencia el perigeo. Con la ecuación 3.9 podemos obtener el valor de Mean Motion. [1][6]

$$MM = \frac{1440 \text{ [min]}}{T \text{ [min]}} \quad \text{Ec. 3.9}$$

donde:

MM = Mean Motion

1440 = tiempo en minutos de un día solar

T = Periodo del satélite dado en minutos

3.1.2.4 Right Ascension of Ascending Node (Ascensión recta del nodo ascendente)

La *ascensión recta de un nodo ascendente*, es uno de los dos números utilizados para orientar el plano orbital, el primero es la inclinación. Para tener un plano orbital

definido, la línea de nodos se proyecta desde cualquier punto sobre el ecuador a ese punto se le denomina como nodo ascendente. Este punto es donde el satélite cruza el ecuador del hemisferio norte hacia el hemisferio sur. [6]

Para saber en qué punto se proyecta la línea de nodo ascendente, se utiliza algo conocido como sistema de coordenadas de ascensión recta, ascensión recta es un ángulo medido en el plano ecuatorial desde un punto de referencia en el cielo donde la ascensión recta se define como 0 y es conocido como equinoccio vernal.

“Ascensión recta de un nodo ascendente, es un ángulo medido en el centro de la tierra, desde el equinoccio vernal hacia el nodo ascendente. Por convención este valor está comprendido entre 0 y 360 grados.”³ Una representación del RAAN se muestra en la figura 3.10. [6]

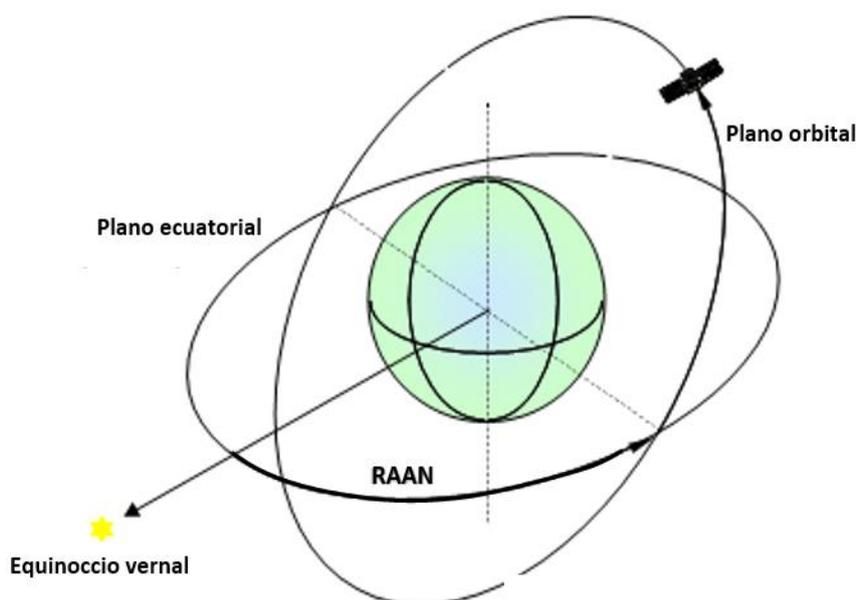


Figura 3-10 Representación del RAAN [62]

3.1.2.5 Orbital Inclination (Angulo de inclinación)

El ángulo de inclinación, nos indica la orientación del plano orbital del satélite con respecto al plano del ecuador.

“El plano orbital siempre pasa por el centro de la Tierra, pero puede estar relativamente inclinado en cualquier ángulo con respecto al ecuador. Inclinación es el ángulo entre el plano orbital y el plano ecuatorial. Por convención, es un número entre 0 y 180 grados.”

³ Capítulo 2 “el rastro satelital” AMSAT

- Las órbitas con inclinación cercana a los 0 grados se denominan orbitas “ecuatoriales”.
- Las órbitas con inclinación cercana a los 90 grados se denominan órbitas “polares”.

La intersección entre el plano ecuatorial y el plano orbital es una línea que se denomina “línea de nodos”.⁴

En la figura 3.11 se muestra el ángulo de inclinación. [1]

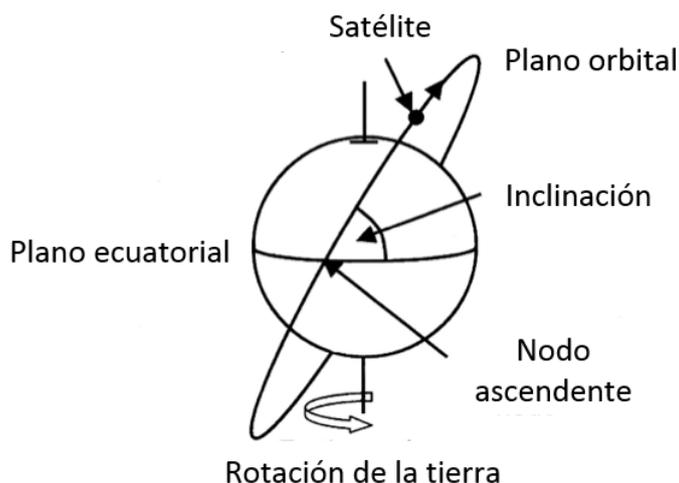


Figura 3-11 Ángulo de inclinación [63]

3.1.2.6 Argument of Perigee (ARGP, Argumento de perigeo)

El **argumento de perigeo**, es un ángulo medido en el centro de la tierra entre dos líneas que cruzan el planeta, estas líneas son: *la línea de nodos* (siendo esta, la línea de intersección entre el plano orbital y el plano ecuatorial) y *el eje mayor* (es la línea trazada del apogeo al perigeo y pasa a través del centro de la tierra), podemos decir entonces que el argumento de perigeo es el ángulo entre el nodo ascendente y el perigeo.

El ARGP, es un valor entre 0 y 360 grados. Podemos obtener el valor de la tasa de cambio de este ángulo con la ecuación 3.10 y podemos observar este ángulo en la figura 3.12. [1][6]

- Perigeo: es el punto donde el satélite está más cercano de la tierra
- Apogeo: es el punto donde el satélite está más alejado de la tierra.

$$w = 4.97 \left(\frac{R_{eq}}{a} \right)^{3.5} \frac{(5\cos^2 i - 1)}{(1 - e^2)^2} \quad Ec. 3.10$$

⁴ Capítulo 2 “El rastreo satelital” AMSAT

donde:

w = tasa de cambio del ARGP en grados por día

R_{eq} = promedio del radio ecuatorial de la tierra en las mismas unidades que "a"

a = semieje mayor

i = inclinación

e = excentricidad

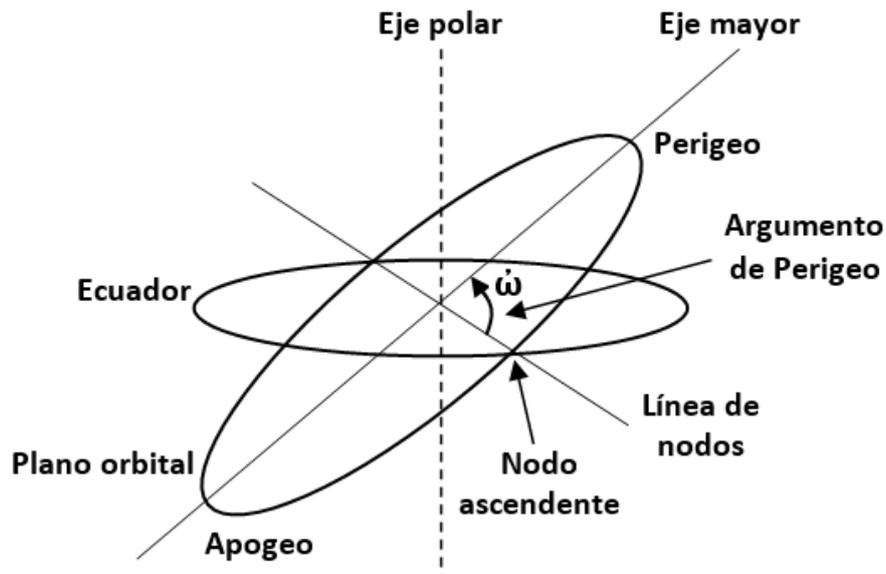


Figura 3-12 Argumento de perigeo [63]

3.1.2.7 Mean Anomaly (Ángulo)

Mean anomaly, Es un valor que especifica la posición del satélite dentro de su órbita en un momento determinado, este momento está dado por el Epoch time y se da como un ángulo entre el perigeo y la posición actual del satélite y puede tener un valor de entre 0 y 360 grados.

El Mean Anomaly, tiene un valor 0 grados en el perigeo y 180 grados en el apogeo, los satélites al cambiar o apagar los modos de operación de sus transpondedores, utilizan el mean anomaly para marcar esos puntos específicos donde realizaran dichas acciones. En la figura 3.13 se observa el mean anomaly. [6]

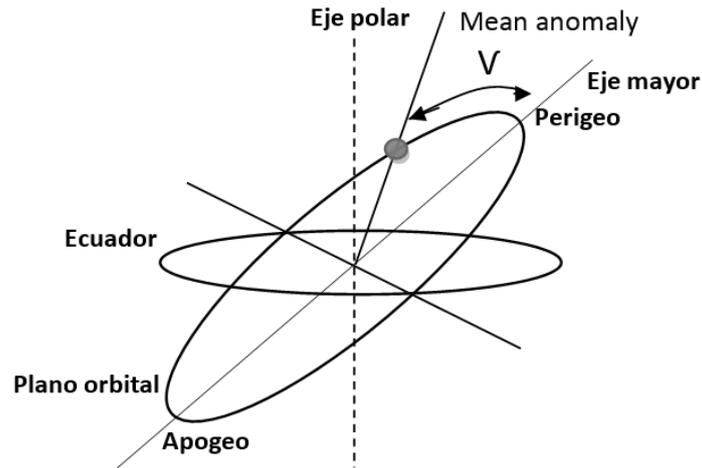


Figura 3-13 Mean anomaly [63]

Drag (N1)

Los satélites se acercan a la tierra debido al arrastre atmosférico, entre más cercanos estén, los satélites se mueven a mayor velocidad debido a este fenómeno. El Drag, es un parámetro opcional y nos indica cómo cambia la velocidad debido a la atracción ejercida sobre los satélites debido a la tierra, utilizan como unidad las revoluciones por día y en satélites de órbita baja el valor está en el orden de 10^{-4} . [6]

Para realizar el seguimiento satelital, se utiliza un software que requiere de ciertos parámetros del satélite, a esta información se le conoce como efemérides y son obtenidas de una base de datos de NORAD (North American Aerospace Defense Command), una organización de los Estados Unidos, y Canadá que provee de defensa y control aéreo a toda Norteamérica, también se encarga de la comunicación global, detección, validación y alerta de posibles ataques hacia Norteamérica y provee alerta temprana en el espacio aéreo . [30]

NORAD, cuenta con una base de datos de los objetos espaciales y es por eso que posee información relevante de los satélites a los que se desea monitorear, también provee de esta información a NASA y esta la publica en su formato de dos líneas, en ocasiones AMSAT traduce esta información a su formato y lo distribuye en los canales de radioaficionado. Estas efemérides, se descargan en el software de seguimiento y se actualizan constantemente con una conexión a internet.

Finalmente el software, con ayuda de estos datos que pueden ser presentados en los dos formatos mencionados, uno llamado de dos líneas utilizado por NASA y otro que es línea por línea utilizado por AMSAT, puede realizar las predicciones de los pases del satélite sobre determinada región. [30]

Capítulo 3: SEGUIMIENTO DE SATÉLITES EN ÓRBITA LEO

Las posiciones de los satélites artificiales, son calculadas con algoritmos, publicados en un documento de NORAD "Space Track Report No. 3". En dicho documento se detallan los modelos orbitales. En ellos se usan distintos algoritmos para satélites a baja altura y los que tienen una órbita más elevada. [31]

A continuación, se presenta un ejemplo del formato de dos líneas o TLE (Two Lines Elements), en el cual se explica cada uno de los elementos. Este formato, es utilizado por NASA y consta de tres líneas, en las cuales la primera indica el nombre informal del satélite, la segunda menciona datos relativos a l satélite y la tercera línea, menciona las efemérides del satélite que definen la órbita [32].

Ejemplo de Formato NASA para el satélite Iridium 46. [32]

<pre>Iridium 46 1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437 2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994</pre> <p>Nombre de este conjunto de datos de tres líneas (hasta 24 caracteres, consistente con el catálogo NORAD) Identificación del satélite.</p>
<pre>Iridium 46 1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437 2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994</pre> <p>Número de línea</p>
<pre>Iridium 46 1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437 2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994</pre> <p>Número de catálogo</p>
<pre>Iridium 46 1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437 2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994</pre> <p>Clasificación de seguridad del conjunto de elementos (U = No clasificado)</p>
<pre>Iridium 46 1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437 2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994</pre> <p>Identificación internacional del objeto. Los primeros dos dígitos corresponden al año de lanzamiento. Los siguientes tres al número de lanzamiento del año. Las ultimas letras (pueden aparecer entre 1 y 3) corresponden a la pieza de lanzamiento.</p>

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Año (dos dígitos)

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Día del año

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Fracción de día

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Signo de la primer derivada de tiempo (puede no aparecer)

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Tasa de decaimiento. Primera derivada de tiempo del movimiento medio (o coeficiente balístico, dependiendo del tipo de efémerides)

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Signo de la segunda derivada de tiempo (puede no aparecer)

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Segunda derivada de tiempo del movimiento medio (se asume el punto decimal)

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Signo del exponente

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Exponente de la segunda derivada de tiempo

Iridium 46

```
1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994
```

Signo del termino de arrastre BSTAR (puede no aparecer)

Iridium 46

```
1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994
```

Termino de arrastrte BSTAR o coeficiente de presión de radiación (se asume el punto decimal)

Iridium 46

```
1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994
```

Signo del exponente

Iridium 46

```
1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994
```

Exponente del termino de arrastre BSTAR

Iridium 46

```
1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994
```

Tipo de efemérides

Iridium 46

```
1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994
```

Número de elemento

Iridium 46

```
1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994
```

Checksum - Modulo 10. Este termino verifica la exactitud de los datos. Se suman todos los datos numéricos. Letras, espacios en blanco y puntos decimales valen 0. Los signos menos valen 1. El dato mostrado corresponde al último decimal de esa suma.

Iridium 46

```
1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994
```

Número de línea

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Número de catálogo

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Inclinación orbital (grados)

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Ascensión Recta del nodo ascendente (grados)

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Excentricidad (se asume el punto decimal)

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Argumento del perigeo (grados)

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Anomalía media (grados)

Iridium 46

1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Número de revoluciones por día

```

Iridium 46
1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Número de revoluciones hasta la fecha

Iridium 46
1 24905U 97043C 03029.77037232 +.00000191 +00000-0 +60972-4 0 00437
2 24905 086.3979 290.5337 0002724 058.5465 301.5990 14.34218966284994

Checksum - Modulo 10. Este termino verifica la exactitud de los datos. Se suman todos los datos numéricos. Letras, espacios en blanco y puntos decimales valen 0. Los signos menos valen 1. El dato mostrado corresponde al último decimal de esa suma.
    
```

Otro ejemplo del formato de dos líneas, es de la ISS (**International Space Station**) [33]

ISS (Estación Espacial Internacional)

```

1 25544U 98067A 15131.57940082 .00016717 00000-0 10270-3 0 9003
2 25544 51.6445 266.8464 0006764 297.6682 62.3785 15.55748935 22340
    
```

En la tabla 3.2 y 3.3 se muestran ejemplos del formato utilizado por AMSAT, el cual es más largo pero sencillo de entender. El de la tabla 3.2, concuerda con el ejemplo anterior de dos líneas de la ISS.

Tabla 3.2 Formato (AMSAT) Satellite: ISS [33]

Catalog Number:	25544
Epoch time:	15131.57940082 = yrday.fracday
Element set:	900
Inclination	51.6445 deg
RA of node	266.8464 deg
Eccentricity	0.0006764
Arg of perigee:	297.6682 deg
Mean anomaly:	62.3785 deg
Mean motion	15.55748935 rev/day
Decay rate	1.67170E-04 rev/day^2
Epoch rev	2234
Checksum	337

Capítulo 3: SEGUIMIENTO DE SATÉLITES EN ÓRBITA LEO

Tabla 3.3 Formato (AMSAT) Satellite: Satélite AO-10

Object Number	14129
NASA Designation	1983-058B
Epoch Time, T0	88239.30510271 Fri Aug 26, 1988.
Epoch Rev, K0	1114
Mean Anomaly, M0	6.0030 deg
Mean Motion, N0	2.05882335 rev/day
Inclination, I0	27.1492 deg
Eccentricity, E0	0.6027104
Arg Perigee, W0	331.5568 deg
RAAN, O0	307.6972 deg
Period	699.428632 min/rev
Increment	174.857158 deg/rev
Beacon, F1	145.8100 MHz
Decay, N1	-1.38E-06 rev/day ²
Element Set	352



Figura 3-14 Estación Espacial Internacional (ISS) [64

]

En la figura 3.15 y 3.16 se muestra un software en línea en el cual se puede obtener la posición del satélite que se desea monitorear y la predicción de algunos pases en los días próximos (menos de 10), lo primero que se pide es que indique la posición geográfica desde la cual desea realizar la observación, en este caso se eligió Juriquilla Querétaro, que es en donde se ubicara la estación terrena (TT&C).

efemérides astronómicas

Localidad: JURIQULLA Longitud: 100.4500° O Latitud: 20.7167° N Altura: 1942 m

[Inicio](#) [Observador](#) [Tiempo](#) [Efemérides](#) [El cielo](#) [Datos](#) [Herramientas](#)

Establecer localidad del observador

Búsqueda de localidad

JURIQUILLA (MEXICO)

NOTA 1: Si se especifica el país, las búsquedas se hacen en las localidades del país especificado. Si no se especifica, se busca en las localidades de todo el mundo. Si pulsas el botón **Buscar** se muestran hasta 100 resultados que coinciden con el patrón de búsqueda.

NOTA 2: En la base de datos, los nombres de las localidades no tienen acentos y la letra Ñ está sustituida por la N. Puedes poner acentos y la letra Ñ en la cadena de búsqueda, pero los acentos serán eliminados y la letra Ñ será cambiada por la N antes de hacer la búsqueda.

NOTA 3: Se instala una cookie en el navegador del usuario para enviar al servidor la posición geográfica del observador en cada petición web. Esto es necesario ya que muchos de los cálculos que se hacen en este sitio requieren de este dato. En ningún caso puede identificar al usuario, solamente contiene información de su posición geográfica.

Figura 3-15 Selección de la localidad del observador [31]



Figura 3-16 Localidad seleccionada (Querétaro) [31]

El siguiente paso, es seleccionar el satélite a observar, se seleccionó en este caso es la estación espacial internacional

Capítulo 3: SEGUIMIENTO DE SATÉLITES EN ÓRBITA LEO

Satélites artificiales

Selecciona un satélite artificial para obtener su posición y otros datos tales como los proximos pasos visibles para los próximos 10 días.

Estación Espacial Internacional (ISS)

Búsqueda por nombre

ISS (ZARYA) (25544)

Búsqueda por número NORAD

Figura 3-17 Selección del satélite ISS [31]

En la siguiente figura 3.18 se muestra la posición actual del satélite ISS en tiempo real, UTC (Tiempo Universal Coordinado), es un estándar utilizado para regular los relojes y el tiempo a nivel mundial. [34]

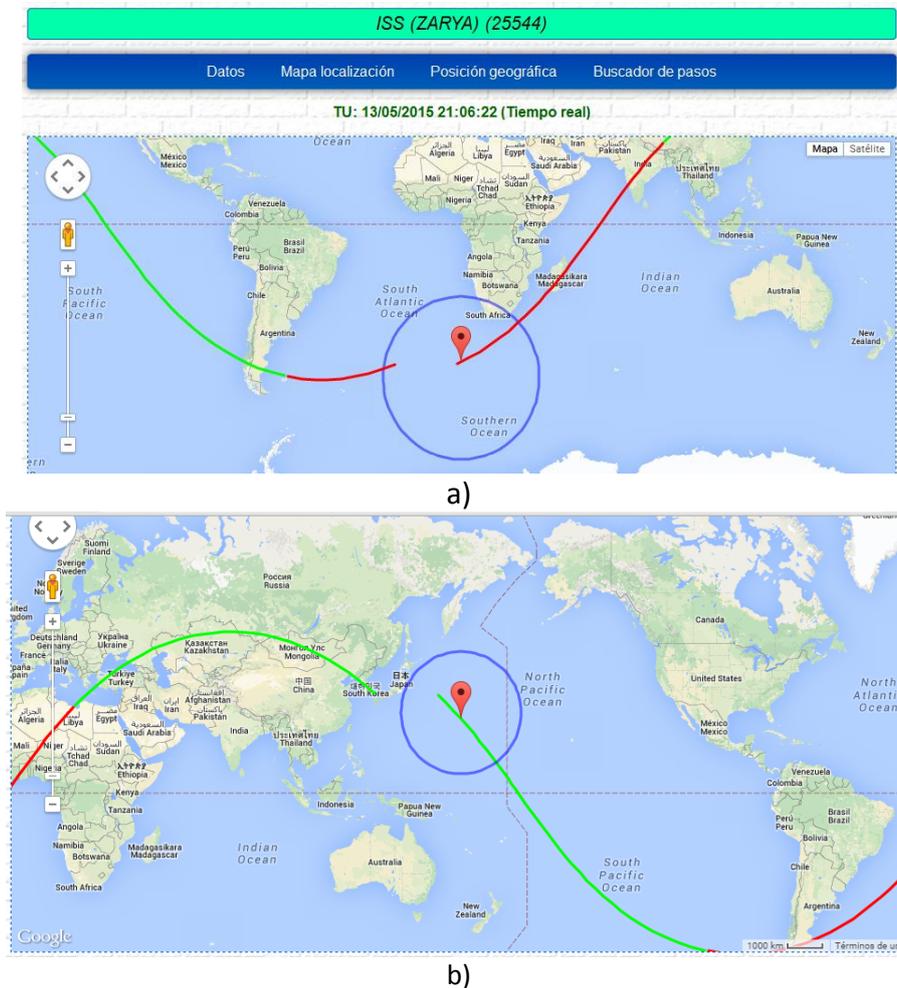


Figura 3-18 a), b) Paso del satélite ISS durante el día [31]

Capítulo 3: SEGUIMIENTO DE SATÉLITES EN ÓRBITA LEO

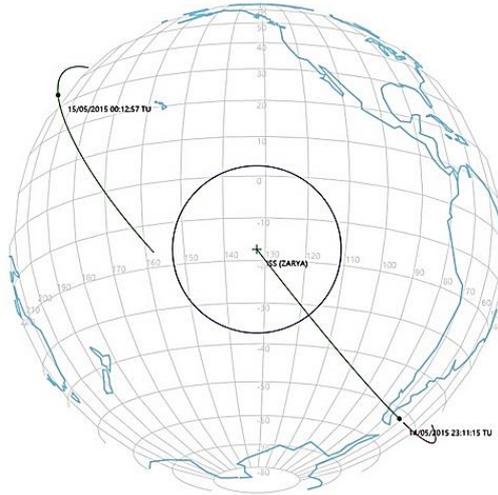


Figura 3-19 Posición del satélite actual en tiempo real [31]

ISS	1	25544U	98067A	15134	59821958	.00016717	00000-0	10270-3	0	9008
	2	25544	51.6458	251.7598	0006994	310.3766	49.6777	15.55981301	22813	
ISS	1	25544U	98067A	15135	56159951	.00016717	00000-0	10270-3	0	9014
	2	25544	51.6459	246.9449	0007184	314.5827	45.4740	15.56002132	22968	
ISS	1	25544U	98067A	15136	07539185	.00016717	00000-0	10270-3	0	9023
	2	25544	51.6456	244.3771	0009929	298.3989	61.6163	15.55043067	23042	
ISS	1	25544U	98067A	15137	10360500	.00016717	00000-0	10270-3	0	9032
	2	25544	51.6454	239.2445	0009997	302.8504	57.1686	15.55101092	23201	
ISS	1	25544U	98067A	15138	06752023	.00016717	00000-0	10270-3	0	9044
	2	25544	51.6460	234.4318	0010086	306.6272	53.3953	15.55156941	23353	

Figura 3-20 Datos obtenidos sobre los pases que realizará el satélite [33]

En la figura 3.20 se observan los elementos orbitales y en los cuadros punteados la fecha de las predicciones realizadas por el software sobre el satélite en formato de dos líneas en el cual se especifica la ubicación del satélite.

3.1.3 Ángulos de azimut y elevación

Para realizar el diseño de un enlace satelital adecuado, es importante recordar que la estación terrena es la encargada de recibir las señales provenientes del satélite, por lo que es necesario que la antena de la estación terrena, este correctamente orientada hacia el satélite, cuando este se encuentre en línea de vista con la antena.

Además de lo anterior, también es importante considerar la distancia entre el satélite y la estación terrena, el ángulo de azimut y el de elevación de la antena de la estación

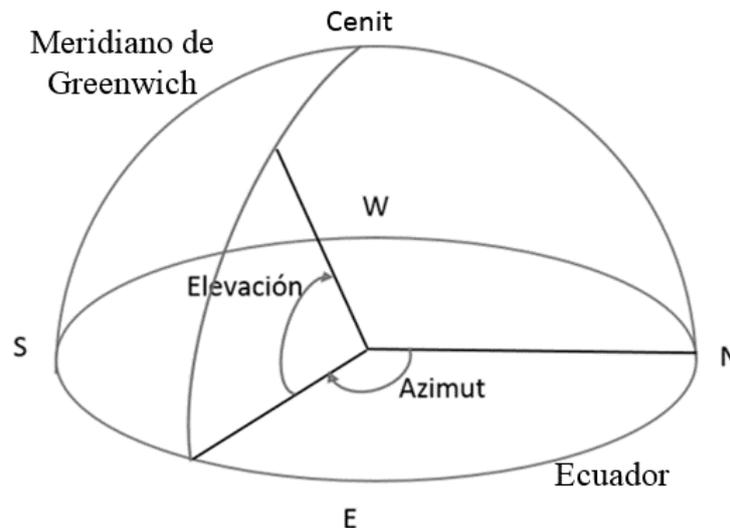
Capítulo 3: SEGUIMIENTO DE SATÉLITES EN ÓRBITA LEO

terrena hacia el satélite medido en grados. Para conocer estos parámetros, existe software especializado que nos puede ayudar a obtenerlos. [7][8]

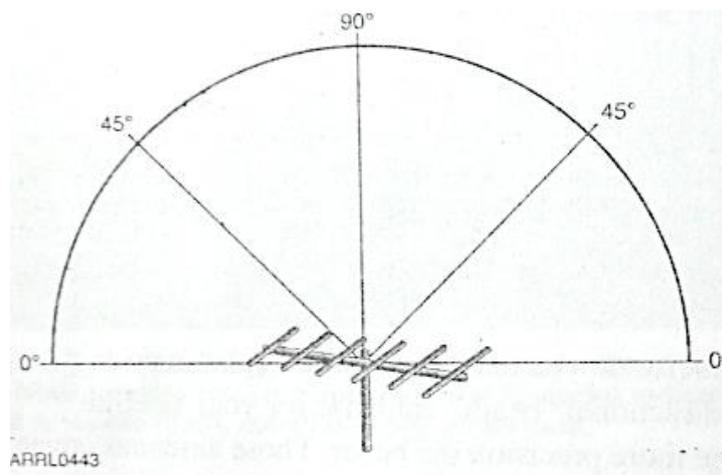
El ángulo de azimut, está referido del norte hacia la posición del satélite mientras que la elevación es el ángulo formado entre la antena de la estación terrena referida al satélite, con respecto al plano de tierra. Para el caso de satélites de órbita baja, el software es necesario debido a que la antena no se mantiene fija, es decir, la antena debe seguir al satélite cuando éste, se encuentre en línea de vista.

El software nos ayuda a realizar el seguimiento con la antena durante el tiempo que el satélite es visible para esa estación terrena. [1]

Para los valores de azimut y elevación, se utiliza como referencia en longitud al meridiano de Greenwich y en latitud al Ecuador, la figura 3.21 muestra los ángulos de azimut y elevación. [7]

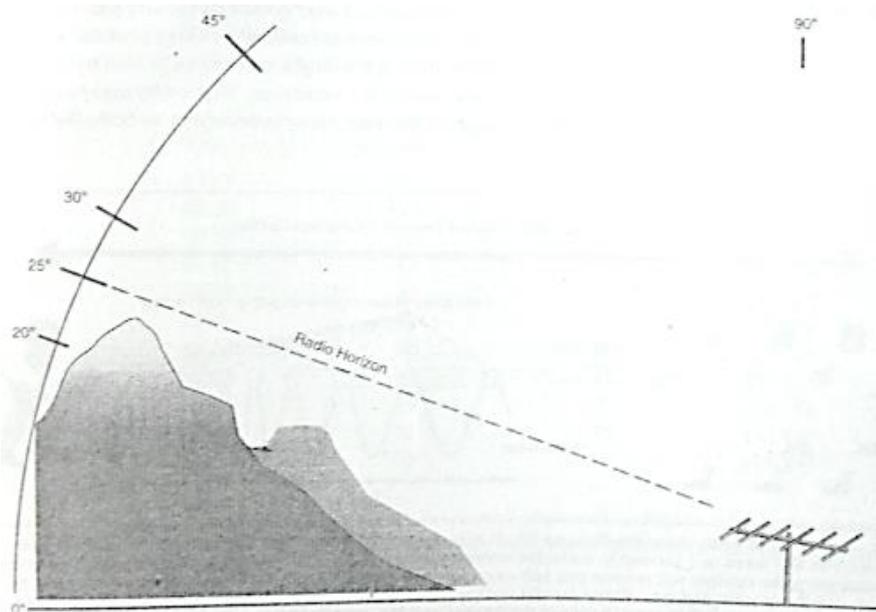


a) [65]



b)[1]

Capítulo 3: SEGUIMIENTO DE SATÉLITES EN ÓRBITA LEO



c)

Figura 3-21 a), b) y c) Ángulos azimut y elevación [1]

Una forma de obtener el valor del ángulo de elevación, es identificando la posición del satélite, el geocentro de la tierra y la estación terrena, estos elementos forman un triángulo AOC y con este podemos conocer el valor de dicho ángulo, en la figura 3.22 se muestran los elementos mencionados. [26]

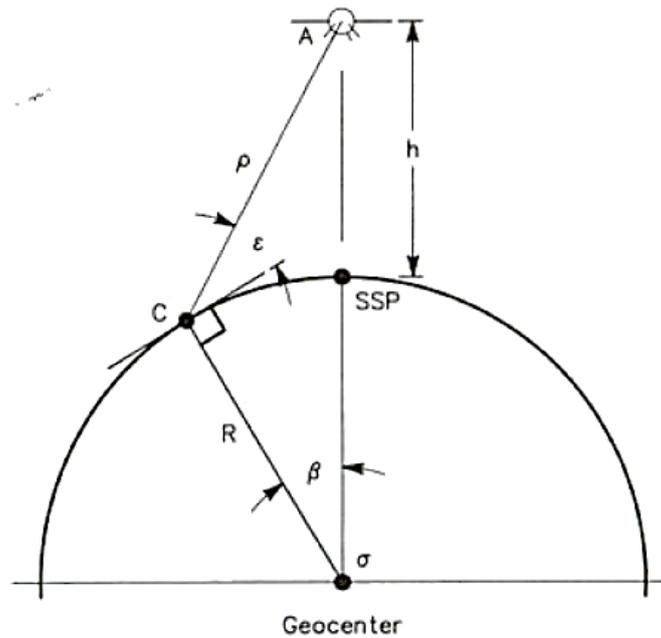


Figura 3-22 Elementos para calcular el ángulo de elevación [26]

Comenzamos con la ecuación 3.11

$$A = 180^\circ - \beta - (\varepsilon + 90^\circ) = 90^\circ - \beta - \varepsilon \quad \text{Ec. 3.11}$$

Aplicando ley de senos a los lados R y R+h

$$\frac{R + h}{\sin(\varepsilon + 90^\circ)} = \frac{R}{\sin(90^\circ - \beta - \varepsilon)} \quad \text{Ec. 3.12}$$

Utilizando identidades de trigonometría $\sin(90^\circ \pm x) = \cos(x)$, se simplifica como:

$$\frac{R + h}{\cos(\varepsilon)} = \frac{R}{\cos(\varepsilon + \beta)} \quad \text{Ec. 3.13}$$

Utilizando la propiedad de adición en la función coseno:

$$\cos(x + y) = \cos(x) \cos(y) - \sin(x) \sin(y) \quad \text{Ec. 3.14}$$

Obtenemos:

$$\frac{R + h}{\cos(\varepsilon)} = \frac{R}{\cos(\varepsilon) \cos(\beta) - \sin(\varepsilon) \sin(\beta)} \quad \text{Ec. 3.15}$$

Finalmente el ángulo de elevación puede ser calculado como: [10D]

$$e = \arctan \left[\frac{(R + h) \cos(\beta) - R}{(R + h) \sin(\beta)} \right] \quad \text{Ec. 3.16}$$

La ecuación se puede reescribir en términos de s y R quedando como:

$$\varepsilon = \arctan \left[\frac{(R + h) \cos(s/R) - R}{(R + h) \sin(s/R)} \right] \quad \text{Ec. 3.17}$$

donde:

ε = Ángulo de elevación

R = Radio medio de la tierra

h = Distancia entre la tierra y el satélite

β = Ángulo central dado en radianes

s = Distancia entre la estación terrena y el SSP (subsattellite point)

Para obtener el valor de ρ , la distancia entre el satélite y la estación terrena se puede utilizar la ecuación 3.18, que se obtiene considerando el triángulo formado por la estación terrena, el geo-centro y el satélite, y utilizar la propiedad de cosenos.

$$\rho = [(R + h)^2 + R^2 - 2R(R + h)\cos(s/R)]^{1/2} \quad \text{Ec. 3.18}$$

donde:

R = Radio de la tierra

h = Distancia entre la tierra y el satélite

s = Distancia entre la estación terrena y el SSP (subsattellite point)

El ángulo de elevación ε y la inclinación ρ , solo dependen de la altura del satélite y de la distancia que existe entre el SSP y la estación terrena.

3.1.4 Huella de cobertura

La huella de cobertura del satélite puede ser definida como el área o sombra sobre la superficie de la tierra que es cubierta por la antena del satélite que está en movimiento y en la cual, una estación terrena puede tener contacto con el satélite o con otra estación terrena que también este dentro de la misma área por medio del satélite.

El tamaño del área de la huella de cobertura depende de la altitud a la que se encuentre el satélite operando, por ejemplo, si se considera un satélite geoestacionario la huella de cobertura es mayor a la que podría cubrir un satélite de órbita baja.

Una diferencia, entre un satélite geoestacionario y uno de órbita baja es que en el primer caso, el área es cubierta permanentemente es decir las 24 horas del día debido a que el periodo de un satélite geoestacionaria es equivalente al de un día solar y esas antenas siempre están direccionadas en la misma posición y disponibles para dar servicio.

El área cubierta por un satélite de órbita baja, es solo por el periodo de tiempo que el satélite pasa por encima de dicha área, esto puede ocurrir entre tres y ocho veces al día y puede durar dependiendo de la altitud algunos minutos cada pasada.[1][15]

La huella de cobertura, puede ser obtenida conociendo algunos datos como la posición de la estación terrena y un punto conocido como SSP (subsattellite point) y la distancia del radio de la tierra. S , es la distancia entre los dos puntos mencionados y nos puede ayudar a conocer el tamaño del área de cobertura, esta distancia s , se puede observar en la figura 3.23 y su valor puede ser calculado con la ecuación 3.19 [26]

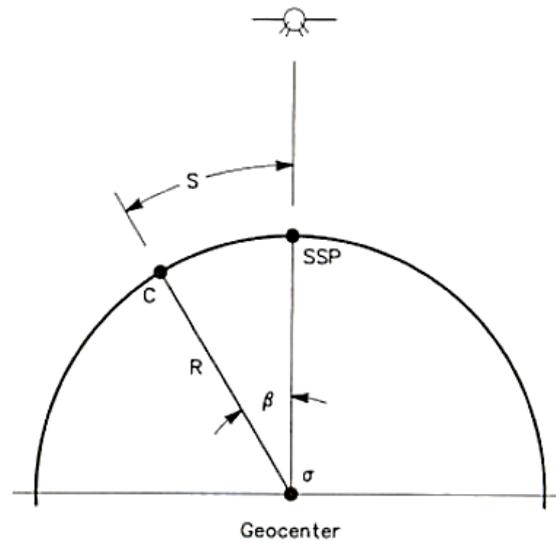


Figura 3-23 Distancia "s", entre la estación terrena y el SSP [26]

$$s = R\beta \quad \text{Ec. 3.19}$$

donde :

R = Radio medio de la tierra [igual unidad de medida que s]

β = Ángulo central [rad]

Con ayuda del geocentro y el valor de distancia entre la estación terrena y el SSP, podemos observar que se forma un cono, a este se le conoce como: cono de cobertura y con este podemos observar en la figura 3.24 que existe un punto máximo en los extremos del cono de cobertura en los que se podrá realizar enlace con el satélite, este punto máximo en el que se puede tener acceso, se conoce como S_0 , que es la distancia máxima de acceso puede ser calculado con la ecuación 3.20. [26]

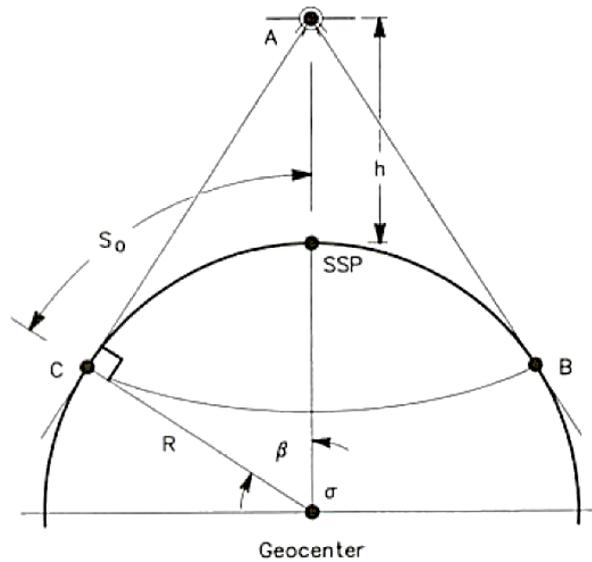


Figura 3-24 Distancia máxima (C-SSP) para realizar enlace con el satélite [26]

$$\cos\beta = \frac{R}{R+h} \quad \text{Ec. 3.20}$$

$$S_0 = R\beta = R \arccos \left[\frac{R}{R+h} \right] \quad \text{Ec. 3.21}$$

En la figura 3.24, se observa que la distancia máxima de acceso es igual a la mitad de la distancia máxima de cobertura del satélite, que es igual a $2 S_0$ ya que esta, va del punto B al punto C (estación terrena) quedando como:

$$2S_0 = 2R\beta = 2R \arccos \left[\frac{R}{R+h} \right] \quad \text{Ec. 3.22}$$

donde:

R = Radio medio de la tierra

h = Distancia entre el SSP y el satélite

La huella de cobertura, también depende de la antena que este a bordo del satélite, una antena direccional con un haz pequeño puede generar una huella de cobertura pequeña aun cuando el satélite opere en una órbita a gran altitud. La figura 3.25 muestra una representación de la cobertura de satélites LEO, y un ejemplo de estos satélites son los de Globalstar.

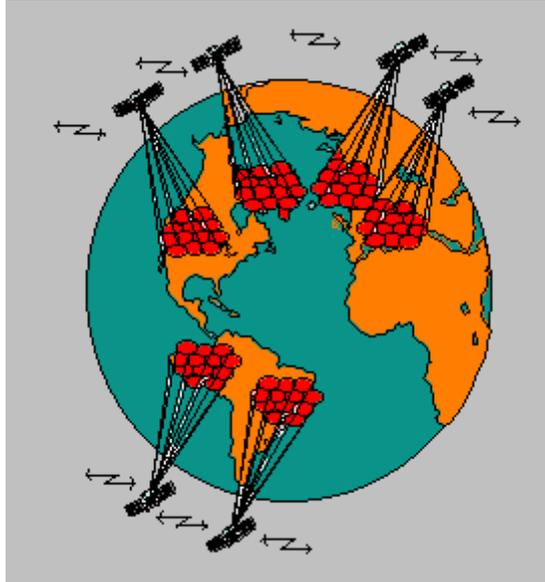


Figura 3-25 Cobertura con satélites LEO [66]

Finalmente si solo se considera la altura a la que opera el satélite, para conocer el área que será cubierta se puede utilizar la ecuación 3.23

$$area(circulo) = 2\pi R^2 \left[1 - \cos\left(\frac{s}{R}\right) \right] \quad Ec. 3.23$$

donde:

R = Radio medio de la tierra

s = Distancia entre la estación terrena y el SSP

En la figura 3.26 se muestra una gráfica que relaciona el ángulo de elevación de las antenas de algunos satélites de órbita baja dependiendo de la distancia en kilómetros (diámetro del círculo) que tienen como cobertura sobre la tierra.

Capítulo 3: SEGUIMIENTO DE SATÉLITES EN ÓRBITA LEO

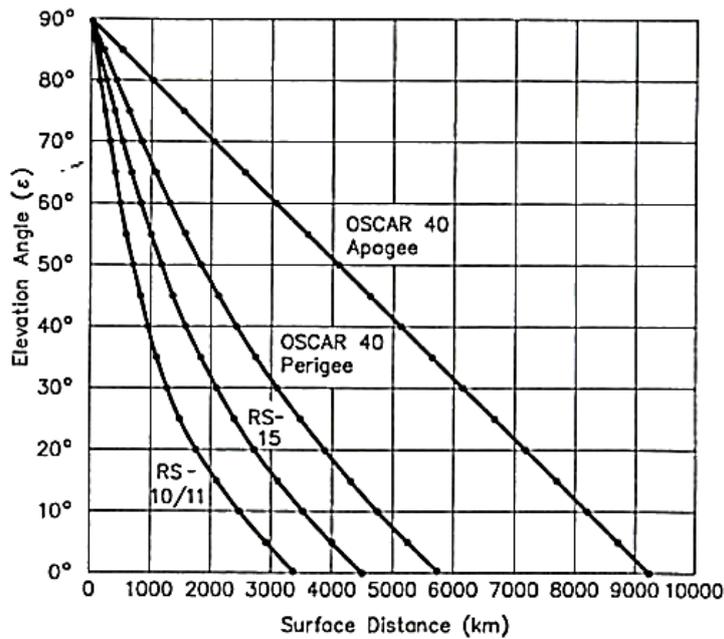


Figura 3-26 Grafica de distancia cubierta según la altura del satélite [26]

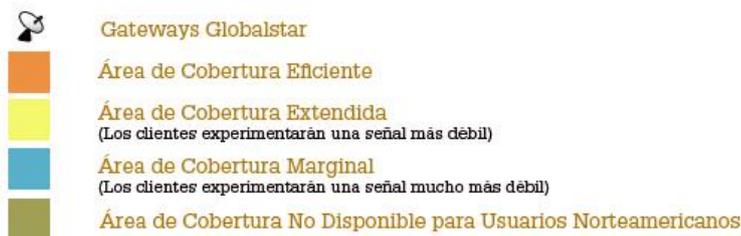
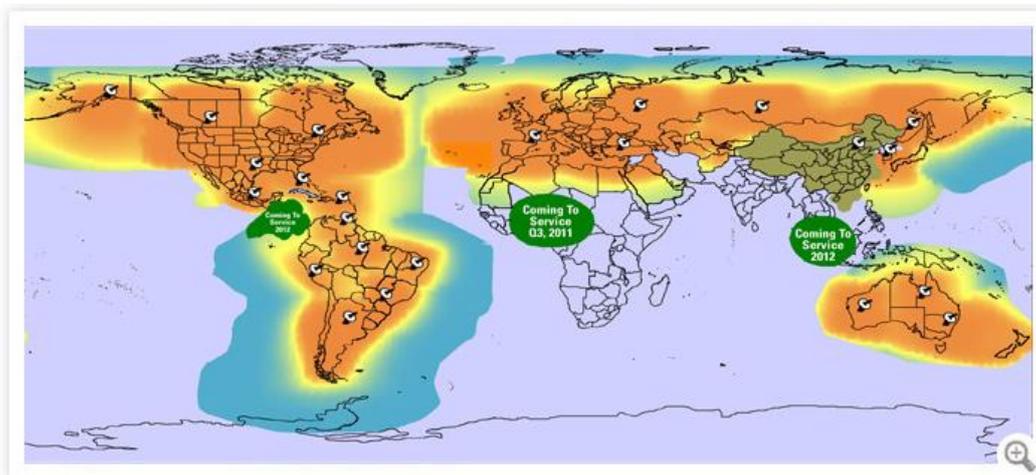


Figura 3-27 Área de cobertura de los satélites Globalstar [67]

Hace algunos años en las estaciones terrenas, no se contaba con software especializado como el que podemos encontrar hoy en día en el mercado, en los cuales con una conexión a internet es posible descargar en el software los elementos orbitales de los satélites que se desea rastrear.

Antes era necesario introducir dichos parámetros a mano lo cual era molesto además de provocar errores en las predicciones si se introducía algún dato erróneo. Por fortuna,

hoy en día existen estas herramientas en las que es posible obtener la información desde una base de datos y se descarga en el software sin errores. Estos datos son actualizados frecuentemente dependiendo de factores como; la órbita del satélite, la ubicación de la estación terrena y de las antenas utilizadas en tierra. [1]

Acquisition of satellite (AOS), es el punto en el que la estación terrena está dentro del área en el que es posible tener comunicación con el satélite, si el software utilizado no controla los rotores o la antena se manipula manualmente, entonces es necesario moverla desde que el satélite es visible en el horizonte y seguirlo hasta perder contacto en el otro extremo, este punto es conocido como, **Lost of Satellite (LOS)**.



Figura 3-28 Seguimiento satelital de forma manual [75]

3.1.5 Software de seguimiento para satélites LEO

Elegir el software correcto para realizar el seguimiento del satélite desde la estación terrena es un paso importante ya que es necesario considerar algunos elementos adicionales como los modelos de radios que son compatibles con ese software, al igual que los rotores de la antena y las características de la computadora.

El software de seguimiento, ha cambiado mucho desde la primer vez que fue utilizado ya que en esa primera ocasión solo se podía obtener información básica acerca de la posición del satélite, sin embargo el software actual de seguimiento es más especializado con lo cual podemos obtener distintos datos tales como:

- Predecir el efecto *Doppler*, lo que nos puede ayudar a compensarlo y reducir su efecto sobre la señal.
- A conocer que regiones en el planeta, tienen la posibilidad de acceso al satélite.
- La orientación de las antenas del satélite, con respecto a la estación terrena y la distancia entre estos.

- Conocer en qué momento se volverá a tener la oportunidad de establecer contacto con el satélite desde una estación terrena particular [1]

Los diseñadores de software deben decidir qué información del satélite incluir al igual que definir que formato es el más útil para mostrar dicha información dependiendo de las necesidades y los intereses del usuario, considerando que hay usuarios que prefieren un formato gráfico como mapas de la posición del satélite en tiempo real y otros que les resulta más práctico ver la información en tablas. [26]

Dentro del mercado, existen varios tipos de software que cubren necesidades específicas, dentro de estos existe uno llamado Mac Doppler Tracking Software AMSAT Special, este nos ayuda a calcular la posición y la velocidad relativa de los satélites a los cuales estamos rastreando, así mismo ajusta automáticamente el desplazamiento Doppler tanto en transmisión como en recepción, también realiza un apuntamiento predictivo a las antenas para que ningún pase se interrumpa.

Este software compatible con equipo de radio de una estación terrena (VHF/UHF) como: YAESU FT-736R, FT-847, ICOM IC-970, IC-820, IC-821H, IC-910, IC-9100 y Kenwood TS-790A, TS-2000.

El Mac Doppler, es utilizado en las estaciones que trabajan en UHF y VHF debido a que en estas frecuencias el desplazamiento en frecuencia o efecto Doppler es significativo en la recepción de la señal por lo que es necesario reducirlo al mínimo. En la figura 3.29 se muestra una pantalla en la cual se emplea el Mac Doppler. [12]

Capítulo 3: SEGUIMIENTO DE SATÉLITES EN ÓRBITA LEO

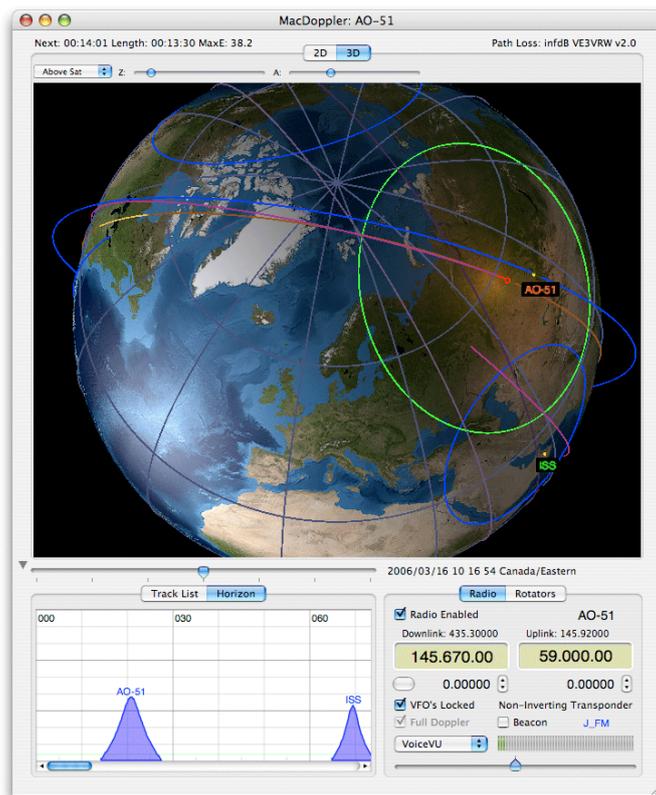


Figura 3-29 Herramienta MacDoppler

Nova for Windows (NfW), es un software de seguimiento satelital con el cual podemos conocer el momento en el que un satélite pasara cerca de nuestra estación terrena tan solo con conocer los parámetros orbitales o elementos Keplerianos de dicho satélite, ya que es con esta información con la cual se calculan el seguimiento y la predicción satelital. NfW es de los programas más utilizados debido a que su interfaz es amigable con el usuario. A continuación, se mencionan algunas de sus características más importantes.

- Mapas de distintos tamaños y a color
- Capacidad de observar múltiples satélites simultáneamente.
- Obtención de la posición satelital de forma rápida y precisa.
- Contiene el soporte de auto-seguimiento de las antenas más utilizadas.
- Es configurable para realizar seguimiento prioritario.
- Contiene algunas bases de datos de satélites en funcionamiento.

En la figura 3.30, se muestra la pantalla de este software en el cual se presenta el área de cobertura del satélite, así como la columna de datos que proporciona la posición actual del satélite. Algunos de los datos proporcionados son: azimut, elevación, altura, tiempo AOS (aparición de vista), tiempo LOS (desaparición de vista), tiempo faltante

hasta la siguiente aparición, duración del tiempo en el que es visible, ángulo de elevación máximo. [9][28]

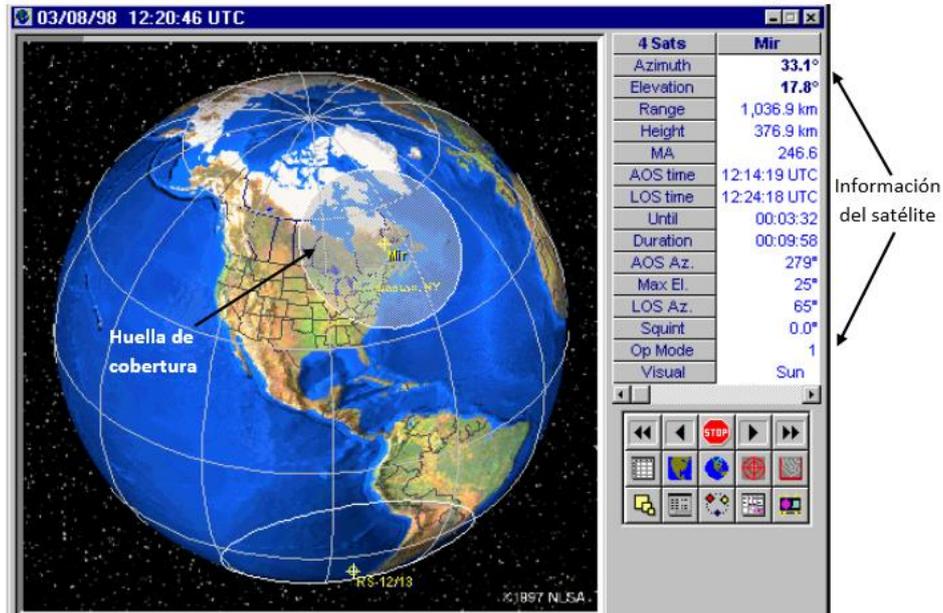


Figura 3-30 Pantalla de Nova for Windows [9]

Orbitron, es un software de seguimiento satelital para radioaficionados también usados por usuarios de satélites de comunicación y astrónomos. Está diseñado para realizar el seguimiento de satélites, con la capacidad de mostrar la posición de los mismos en cualquier momento.

Con la herramienta Orbitron, es posible elegir el satélite que desea ser rastreado eligiéndolo de una base de datos. Ya que se elige uno, es posible visualizar su ubicación así como conocer la información de su posición y realizar alguna predicción de la siguiente ocasión en la que será visible para la antena de la estación terrena que realizo el cálculo, además de ser sencillo de utilizar.

Algunas de sus características son:

- Realizar predicciones de próximas apariciones en línea de vista.
- Realizar seguimiento de varios satélites simultáneamente
- Seguimiento de la luna y el sol
- Resolución de la pantalla de 640x480
- Esquema de color oscuro para uso de noche
- Base de datos de satélites por frecuencia
- Soporte de rotor integrado [10][11]

En la figura 3.31 se muestra la pantalla del software orbitron en el cual en la parte izquierda de la pantalla se muestran las opciones de satélites y ya que se eligió uno, en

Capítulo 3: SEGUIMIENTO DE SATÉLITES EN ÓRBITA LEO

la parte inferior se muestran las predicciones de próximos pases, realizadas por el software.

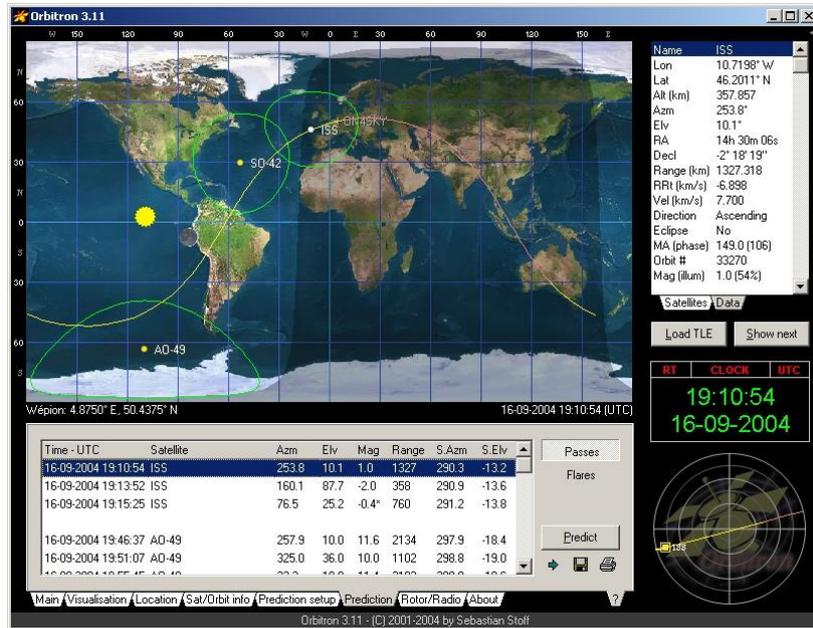
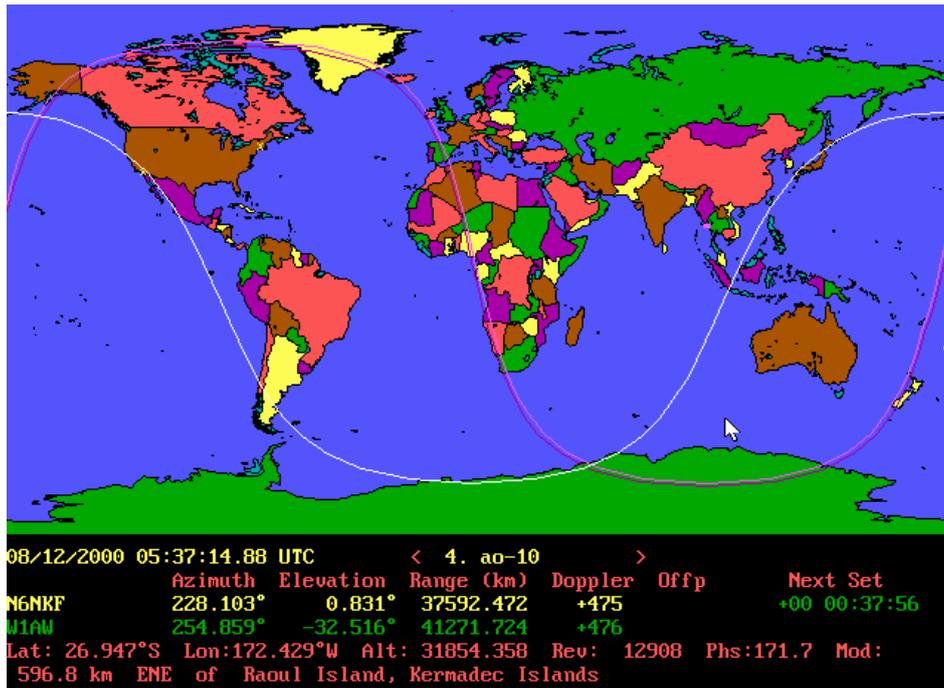


Figura 3-31 Software Orbitron [69]

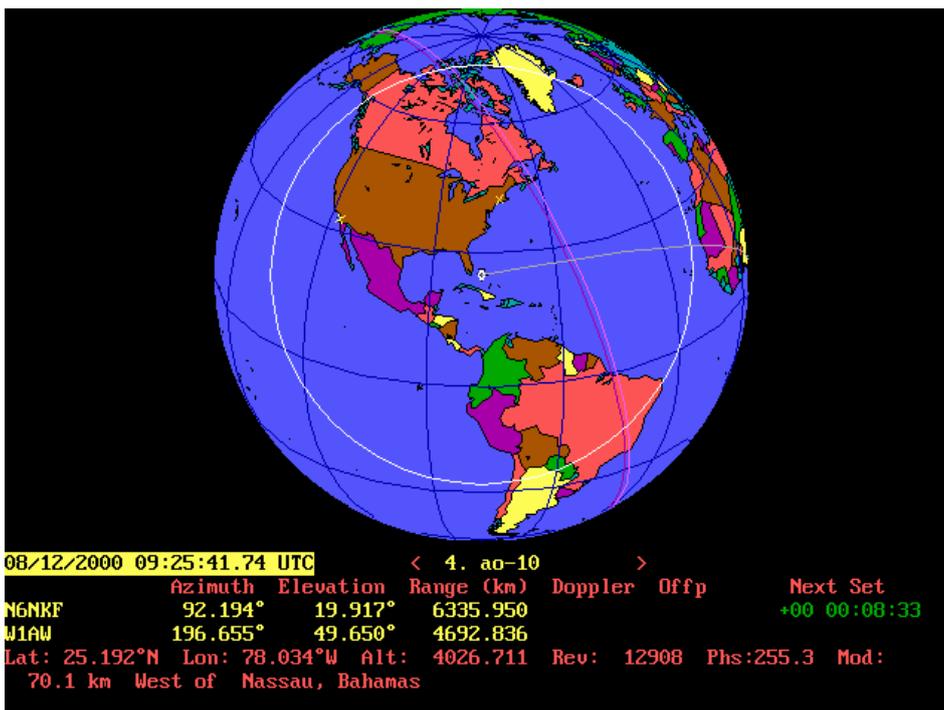
Instant Track, es un software que corre en ambiente DOS y fue uno de los primeros programas que se emplearon para el seguimiento de satélites en órbita baja (LEO). De hecho, el equipo de ingenieros que trabajó en el desarrollo del Micro satélite universitario UNAMSAT-B de la Universidad Nacional Autónoma de México utilizó este software para llevar a cabo maniobras de rastreo del satélite.

En la figura 3.32 se muestra una imagen con dos de las pantallas que se generan al emplear esta herramienta.

Capítulo 3: SEGUIMIENTO DE SATÉLITES EN ÓRBITA LEO



a)



b)

Figura 3-32 a), b) Instant Track para seguimiento de satélites (LEO)

Existen otras herramientas en línea que nos ayudan al seguimiento de satélites incluyendo a la Estación Espacial Internacional (EEI) si es que se desea hacer comunicados vía radio con la tripulación. En la fig. 3.33 se muestra una herramienta en línea para el seguimiento de satélites.

Capítulo 3: SEGUIMIENTO DE SATÉLITES EN ÓRBITA LEO

ONLINE SATELLITE AND FLARE TRACKING

ISS Position and HD Camera FOV (Sunrise in 1 min 38 s)

[Add](#) | [Remove](#) | [Manage list](#)

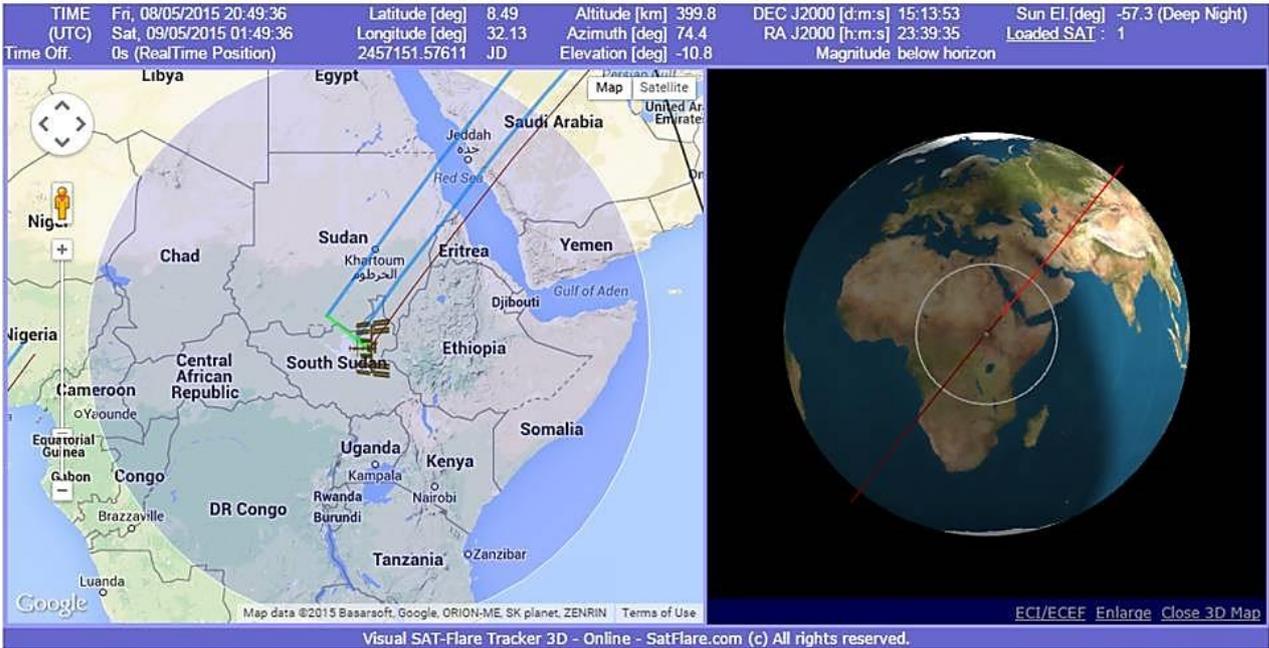


Figura 3-33 Herramienta en línea de seguimiento de satélites (LEO) [68]

Capítulo 4:

***NORMATIVIDAD Y REGULACIÓN DE
FRECUENCIAS PARA OPERAR SATÉLITES LEO***

Normatividad, es una agrupación o conjunto de normas, leyes y reglas que ayudan al buen funcionamiento de la institución para cumplir las metas y propósitos en cierta materia o actividad. En este caso se trata de las instituciones encargadas de la regulación del aprovechamiento del espectro radioeléctrico en frecuencias de UHF y VHF, para operar satélites LEO.

4.1 Organismos nacionales e internacionales

Existen varias instituciones que emiten documentos en los cuales se especifican las actividades que se pueden realizar dentro del espectro radioeléctrico, algunas de estas instituciones a nivel internacional son:

La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), IARU (International Amateur Radio Union), y a nivel nacional el encargado es el IFT (Instituto Federal de Telecomunicaciones) y SCT (secretaría de comunicaciones y transportes) quien es la encargada de realizar la gestión o emitir la solicitud del uso de frecuencias ante los organismos internacionales correspondientes.

Estas organizaciones son las encargadas de aprovechar de manera eficiente y responsable el espectro radioeléctrico.

4.1.1 Organismo reguladores para la asignación de frecuencias (IARU, UIT)

La **IARU** (Unión Internacional de Radioaficionados), es una organización creada en París, Francia y ha sido la mejor voz de los radioaficionados en el mundo desde 1925. La IARU al igual que la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) dividió las frecuencias en tres regiones dependiendo de la zona geográfica (región 1, contempla Europa, África, medio oriente y partes de Asia, Región 2 lo componen norte, sur y centro América y Región 3 es el resto de Asia y el Pacífico).

La IARU, está constituida por más de 160 sociedades miembros alrededor del mundo. Dentro de la IARU, no existen miembros individuales lo que significa que para estar dentro de esta organización es necesario pertenecer a una sociedad de radioaficionados que sea miembro de la IARU. En la figura 4.1 se muestra el símbolo de la página oficial de la IARU.



Figura 4-1 Símbolo de la IARU [14]

En la figura 4.2 se muestran las regiones divididas por la IARU

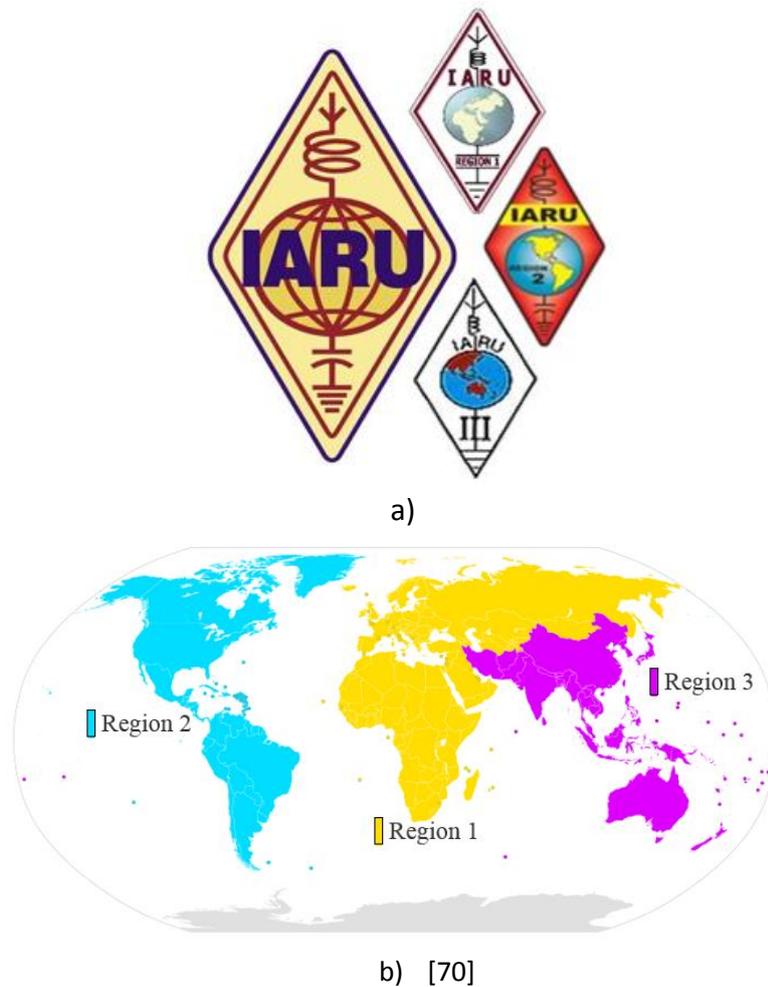


Figura 4-2 a) Emblemas de las 3 regiones, b) Regiones definidas por la ITU-IARU

“La UIT (Unión internacional de Telecomunicaciones), es el organismo especializado de las Naciones Unidas para las tecnologías de la información y la comunicación- TIC

Atribuimos el espectro radioeléctrico y las órbitas de satélite a escala mundial, elaboramos normas técnicas que garantizan la interconexión continua de las redes y las tecnologías, y nos esforzamos por mejorar el acceso a las TIC de las comunidades insuficientemente atendidas de todo el mundo.”⁵

La UIT cuenta con su sede en Ginebra Suiza y con doce oficinas regionales alrededor del mundo, por ejemplo en “Addis Abeba (para África), Brasilia (para las Américas), El Cairo (para los Estados Árabes), Bangkok (para Asia y el Pacífico), una Unidad de Coordinación para Europa en la Sede de la UIT (para los países europeos), Moscú (para los países de la CEI), nos ayudan a mantener un contacto directo y constante con las autoridades

⁵ www.itu.int/es/about/Pages/default.aspx

nacionales, las organizaciones regionales de telecomunicaciones”⁶ y tienen como compromiso conectar a la población de todo el mundo sin importar los medios con los que cuente cada persona o región.

En la actualidad la comunicación es utilizada en áreas como: seguridad, abastecimiento de agua, la red eléctrica y para la distribución de alimentos, también pueden ser utilizados para atención médica por medio de satélites con servicio de ciber-salud, para la enseñanza con tele-educación y algunas redes de transporte, esto ayuda a la gente a comunicarse en todo momento desde casi cualquier lugar en el mundo.

Algunas de las actividades más importantes realizadas por la UIT es brindar la comunicación de forma segura y a precio adecuado gracias a la participación de sus miembros entre los cuales existen instituciones académicas, estados y empresas privadas.

“La UIT es el primer foro mundial en el que las partes colaboran para lograr un consenso sobre una amplia gama de cuestiones que afectan a la futura orientación de la industria de las TIC.”⁷ En la figura 4.3 se muestra el logo de la página principal de la UIT



Figura 4-3 Logo de la página web oficial de la UIT [37]

Para poder pertenecer como socio de la UIT, es necesario afiliarse para lo cual se debe de cubrir un costo voluntario que sobrepase el importe mínimo dependiendo de cada país y de la actividad a la que se dedique por ejemplo, si es institución académica el importe es menor al de un miembro del sector de normalización.

Importe de afiliación

⁶ <http://www.itu.int/es/ITU-D/Pages/Regional-Presence.aspx>

⁷ <http://www.itu.int/es/about/Pages/membership.aspx>

Existe un importe mínimo, para ser afiliado a la UIT, este se muestra en la tabla 4.1 y varía según sus actividades, se debe pagar anualmente en unidades contributivas y lo deben hacer los estados miembros y miembros de sector.

El importe mínimo, puede ser sobrepasado por los miembros, quienes eligen libremente su contribución anual. Las organizaciones especializadas si así lo desean, pueden participar como asociados en trabajos de una sola comisión de estudio.

Si quien desea ser miembro, es una institución académica, una universidad o centro de investigación, estos serán beneficiados con precios especiales al igual que ocurrirá con los miembros de sector de países en desarrollo.

Tabla 4.1 Contribuciones Anuales UIT [37]

IMPORTES MINIMOS DE LAS CONTRIBUCIONES ANUALES*	
Sector de Normalización / Radiocomunicaciones	
Miembros del sector	31,800
Miembros de Sector de países en desarrollo (renta per cápita no superiores a 2 000 USD)	3,975**
Asociados	10,600
Instituciones académicas y establecimientos de investigación	3,975
Instituciones académicas y establecimientos de investigación de países en desarrollo	1,987.50
Sector de Desarrollo	
Miembros del sector	7,950
Miembros del sector de países en desarrollo	3,975
Asociados	3,975
Asociados de países en desarrollo	1,987.50
Instituciones académicas y establecimientos de investigación	3,975
Instituciones académicas y establecimientos de investigación de países en desarrollo	1,987.50

* Todos los importes en CHF

** Que todavía no sea Miembro de Sector ni sea una filial de una empresa multinacional con sede en un país en desarrollo “⁸

CHF, es el símbolo utilizado para identificar el franco suizo, siendo este la moneda oficial de Suiza, su equivalencia con nuestra moneda nacional es: 1 franco suizo =16.3817942 pesos mexicano [15]. México es un país miembro desde el 01 de julio de 1908, si se

⁸ <http://www.itu.int/es/about/Pages/membership.aspx>

desea conocer a todos los países miembros, la lista se encuentra en la siguiente página web:

<http://www.itu.int/online/mm/scripts/mm.list? search=ITUstates& languageid=1>

La UIT, en su visión se compromete a conectar a las personas en todo el mundo y los logros podemos observarlos al ver la cantidad de gente en todo el mundo que utiliza la telefonía móvil, las personas con acceso a la televisión y a los nuevos usuarios de internet anualmente.

En el mundo muchas personas utilizan los servicios satelitales de distintas maneras, ya sea utilizando un sistema de navegación, alguna previsión meteorológica o el servicio de televisión en alguna zona aislada, para todos estos servicios, es necesario contar con las estaciones terrenas que son quienes reciben la información proveniente de los satélites y posteriormente la distribuyen en las redes terrestres. [37]

Para que la UIT pueda lograr un sistema permanente de comunicación global, es necesario que obtenga acuerdos relacionados a las tecnologías, servicios y la atribución de recursos como el espectro de radiofrecuencia y posiciones orbitales de satélites. [37]

La red mundial de telecomunicaciones, es utilizada por todos nosotros cada vez que recibimos un correo electrónico, escuchamos la radio, vemos la televisión o utilizamos nuestro teléfono celular y todo esto es gracias a la UIT.

La figura 4.4 muestra algunos servicios de telecomunicaciones por satélite y en la cual se observa la importancia de contar con estaciones terrenas ya que son una parte importante de estos servicios pues es ahí donde se recibe y distribuye la información.

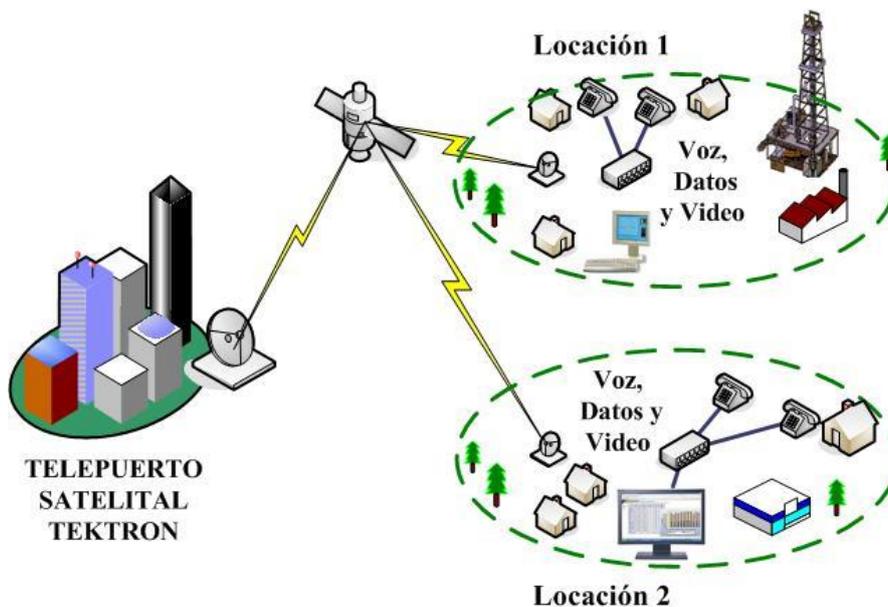


Figura 4-4 Algunos servicios satelitales [71]

- *“Los protocolos, normas y acuerdos internacionales de la UIT rigen el sistema mundial de telecomunicaciones.*
- *La UIT coordina todos los **satélites** gestionando el espectro y las órbitas, y gracias a ella tenemos acceso a la televisión, la navegación GPS para los vehículos, las comunicaciones marítimas y aeronáuticas, la información meteorológica y cartografía en línea, y hace posible las comunicaciones incluso en los lugares más recónditos del planeta.*
- *La UIT hace posible el acceso a Internet. La mayoría de las conexiones Internet resulta más fácil gracias a las normas de la UIT.*
- *La UIT contribuye a **mantener las comunicaciones en casos de catástrofe y emergencias** – a través de la prestación de asistencia en el terreno, los canales de comunicaciones destinados a las emergencias, las normas técnicas para los sistemas de alerta temprana, y la ayuda práctica a la reconstrucción tras una catástrofe.*
- *La UIT es el motor de la revolución móvil, al concebir las normas técnicas y marcos políticos que hacen posible la tecnología móvil y la banda ancha.*
- *La UIT trabaja con asociados de los sectores público y privado a fin de asegurar que el acceso y los servicios de TIC resulten asequibles, equitativos y universales.*
- *La UIT emancipa a gente de todo el mundo a través de la enseñanza y la capacitación tecnológica.”⁹*

4.1.1.2 UIT-R

Dentro de la UIT existen tres sectores en los que se dividen las funciones que realiza esta institución, uno de ellos es el **UIT-T**, sector de la normalización de las telecomunicaciones, el **UIT-D** sector de desarrollo de las telecomunicaciones y finalmente la **UIT-R** sector de radiocomunicaciones.

Este último, UIT-R es el área encargada de realizar la gestión del espectro radioeléctrico y las orbitas satelitales que son recursos naturales limitados con una demanda creciente por el uso de servicios fijos y móviles de radiodifusión, de investigación espacial, de telecomunicaciones, de meteorología, sistemas de posicionamiento, observación y comunicaciones para seguridad de la humanidad. [35][36]

⁹ <http://www.itu.int/es/about/Pages/vision.aspx>

La misión de este sector, *“es garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los que emplean órbitas de satélites, así como realizar estudios y adoptar Recomendaciones sobre las radiocomunicaciones.”*¹⁰ [6] en la figura 4.5 se muestran las antenas de una estación terrena.



Figura 4-5 Antenas de una Estación terrena en funcionamiento

El objetivo principal de este sector, es garantizar el funcionamiento de los sistemas de radiocomunicaciones sin interferencia. También crean algunas recomendaciones para garantizar la calidad y eficacia de los sistemas.

La UIT-R también se encarga de gestionar los procedimientos de coordinación e inscripción de los sistemas espaciales y estaciones terrenas, otorga segmentos orbitales que puedan apoyar al desarrollo de nuevos servicios de satélite. [36]

SERVICIOS ESPACIALES

Dentro de la UIT-R, existe el departamento llamado de servicios espaciales, este es el *“responsable de los procedimientos de coordinación e inscripción de los sistemas espaciales y las estaciones terrenas. El Departamento se encarga de la recopilación, procesamiento y publicación de los datos y lleva a cabo exámenes de las notificaciones de asignaciones de frecuencias presentadas por las administraciones para su inclusión en los procedimientos de coordinación formales o su inscripción en el Registro Internacional de Frecuencias (MIFR).”*¹¹

¹⁰ <http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=itur-welcome&lang=es>

¹¹ <http://www.itu.int/ITU-R/go/space/es>

4.1.2 Organismos gubernamentales mexicanos encargados de la regulación y asignación de frecuencias (IFT - SCT)

El Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) es un órgano autónomo y su objetivo es el desarrollo de las telecomunicaciones en México conforme a lo escrito en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Esto es posible mediante la regulación y supervisión del aprovechamiento y explotación del espectro radioeléctrico, las redes y la prestación de servicios públicos de radiodifusión telecomunicaciones, etc. También se encarga de garantizar el acceso a los servicios mencionados incluyendo banda ancha e internet. [40]

4.1.2.1 Licencia para instalar y operar estaciones Radio Eléctricas (VHF/UHF)

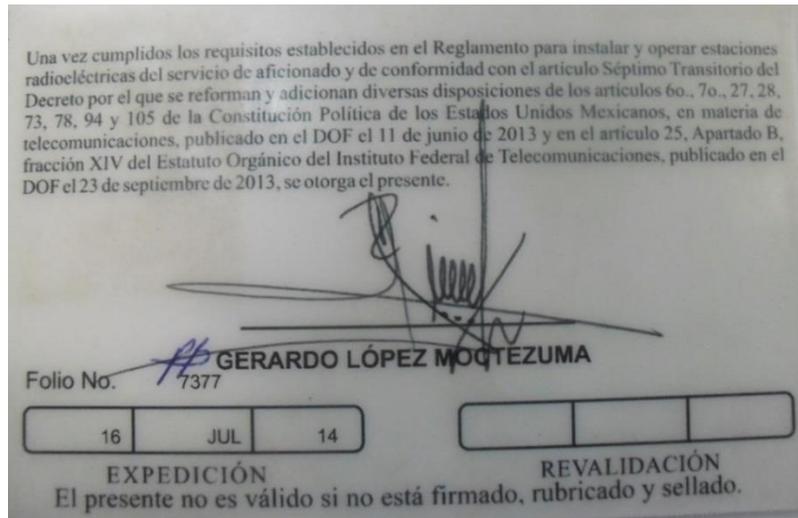
Para operar un satélite desde tierra, es necesario contar con una licencia o certificado de aptitud para radioaficionado, mejor conocido como “letras”, es un permiso con indicativo (XE1) que se le otorga a cualquier ciudadano que desee dedicarse a experimentar o hacer Radio, utilizando las bandas asignadas para la Radio afición. Este permiso nos permite instalar y operar estaciones radioeléctricas del servicio de aficionado,

La obtención de este certificado requiere de la realización de algunos exámenes tales como: conocimientos del reglamento de radioaficionado, código Morse y electrónica básica. Esta licencia es muy poco utilizada en México debido a que son pocas las personas que cuentan con permisos y licencias que desean practicar esta actividad, sin embargo dentro de la UNAM hay jóvenes que aplican para obtener su licencia.

En la figura 4.6 a),b) se muestra un ejemplo del certificado de aptitud o letras de radioaficionado emitido por el IFT (Instituto Federal de Telecomunicaciones) en 2014, con categoría II y vigencia hasta 2019.



a)



b)

Figura 4-6 a),b) Certificado de aptitud para radioaficionado

4.1.2.2 Obtención de certificado de radioaficionado en México

Exámenes y documentación requerida.

Las “letras de radioaficionado”, son un distintivo que se le asigna a cada persona que desea realizar comunicaciones por satélites y terrestre vía radio e incluso todos los astronautas y cosmonautas que forman parte de una tripulación en la Estación Espacial Internacional (EEI) deben de contar con dicho certificado con sus letras.

Del permiso mostrado en la figura 4.6 a), vemos que las letras asignadas son XE1YMM (XE1)(Y-ankee)(M-ike)(M-ike), las cuales hacen uso de códigos fonéticos internacionales.

En la Figura 4.7 se muestra a la astronauta Norteamericana Susan J. Helmes, KC7NHZ hablando con Radioaficionados en la tierra desde el modulo “Zarya” de la Estación Espacial Internacional (EEI).



Figura 4-7 Astronauta Norteamericana Susan J. Helmes, KC7NHZ (NASA)

ARISS (Amateur Radio on the International Space Station) fue creada en 1996 para llevar a cabo actividades relacionadas con la Radio Afición espacio – tierra y desde la MIR y el Transbordador espacial. Ver figura 4.8.



Figura 4-8 Logo de la estación de Radio Aficionado a bordo de la (EEI)

Las siguientes frecuencias son empleadas por contactos con Radio aficionados (QSO's):
Voz and SSTV bajan en la frecuencia de 145.80 MHz (en todo el mundo).

Voz de subida: 144.49 MHz para las regiones 2 y 3 según la UIT (las Américas, el pacifico y Sur de Asia). Voz de subida: 145.20 MHz para la región 1 (Europa, Rusia y África).

Ahora bien, el certificado es expedido a las personas que demuestran tener el conocimiento, la aptitud y la capacidad de operar una estación de radioaficionado para comunicaciones terrestres o por satélite. Cuando se cuenta con este permiso. Por ejemplo si se acreditan los tres exámenes se puede ser parte del radio club llamado XE1RCS. [16]

Existen dentro de esta actividad varios permisos o certificados de aptitud clasificados dependiendo de la clase de aficionado a la que se desee pertenecer. Se realizarán un número y en un grado distinto los exámenes dependiendo de la clase, además de contar con una vigencia distinta en cada certificado, con posibilidad o no de ser prorrogable. La SCT, exige a los aspirantes a radioaficionado la realización de tres exámenes, los cuales son: [16]

- **Técnicas.-** *Conocimientos generales sobre electrodinámica y radiocomunicaciones.*
- **Legislativas.-** *Conocimientos generales sobre la Ley de Vías Generales de Comunicación y Reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, aplicables al Servicio de Aficionados, así como el Reglamento para Instalar y Operar Estaciones Radioeléctricas del servicio de Aficionados.*
- **Telegrafía.-** *Aptitud para transmitir a mano y recibir a oído señales del Código Morse Internacional.¹²*

Dependiendo del nivel, en la tabla 4.2 Se muestran los exámenes que debe presentar, la vigencia y si es renovable.

Tabla 4.2 Características de los exámenes para radioaficionado [16]

Clase:	Exámenes	Vigencia	Renovable
Aficionado Clase I	Técnico Legislativo Telegrafía (10 palabras por minuto)	5 años	SI
Aficionado Clase II	Técnico Legislativo Telegrafía (7 palabras por minuto)	5 años	SI
Aficionado Novato	Técnico Legislativo	2 años	NO
Aficionado Restringido	Técnico Legislativo	1 año	NO

Para la realización y preparación de estos exámenes, la SCT, realizó un documento titulado “Reglamento para instalar y operar estaciones de radio eléctricas del servicio de aficionado”. Además de publicar una “guía general de radioaficionados”. En la tabla 4.1 se muestra la cantidad de preguntas contenidas en la guía. [16]

¹² Reglamento para instalar y operar estaciones Radio eléctricas del servicio de aficionados

Tabla 4.3 Cantidad de preguntas de la guía de radioaficionado

Tema	# de preguntas
Electricidad y magnetismo	100
Electrónica y radiocomunicación	84
Transistores	15
Semiconductores	49
Líneas de transmisión	42
Dibujo de diagramas	36
Propagación de ondas	17

Dentro del Reglamento para Instalar y Operar Estaciones Radioeléctricas del servicio de Aficionados, que fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 28 de noviembre de 1988. Se mencionan los requisitos que debe cumplir quien desee iniciar su trámite para obtener un certificado de aptitud, estos se mencionan a continuación

- *“Ser de nacionalidad mexicana.*
- *Ser mayor de edad y exhibir constancia de escolaridad, teniendo como mínimo el certificado de instrucción primaria.*
- *Si es menor de edad, haber cumplido 12 años como mínimo y exhibir el certificado de instrucción primaria. En este caso solamente podrá ser titular de un certificado si un aficionado mayor de edad, titular de un certificado de igual o superior clase al solicitado, acepta la responsabilidad solidaria por escrito, con el solicitante.*
- *Presentar ante la Secretaría por escrito, una solicitud con los anexos requeridos. Se podrá utilizar la forma que para el efecto le proporcione dicha Dependencia.*
- *Justificar mediante copia del recibo oficial de pago que se cubrieron los derechos a que se refiere el Artículo 17.”*¹³

*Artículo 17: Los interesados en obtener un certificado de aptitud de aficionados, así como el registro y los permisos para instalar y operar estaciones, cubrirán al Gobierno Federal a través de la autoridad respectiva por concepto de su expedición, el monto de los derechos que señale la Ley Federal de Derechos; así como los montos por los diversos trámites que sobre el Servicio de Aficionados establece dicha Ley.*¹⁴

Dentro de este reglamento, lo que se menciona acerca de la instalación de una estación radioeléctrica se encuentra en los artículos; 18,19 y 20, que se citan a continuación:

“ARTÍCULO 18.- las estaciones radioeléctricas para el servicio de aficionados, de conformidad con su operación se clasifican en fija, repetidora, móvil y portátil.

¹³ Reglamento para instalar y operar estaciones Radio eléctricas del servicio de aficionados

¹⁴ Reglamento para instalar y operar estaciones Radio eléctricas del servicio de aficionados

ARTÍCULO 19.- La Secretaría autorizará la instalación u operación de las estaciones radioeléctricas del Servicio de Aficionados de acuerdo con las siguientes condiciones:

- a) La persona titular de un certificado de Clase I o II, podrá otorgársele el permiso para instalar y operar una estación fija, una estación móvil y una portátil cubriéndolo previamente los requisitos que establece este reglamento.*
- b) Cuando por necesidades del servicio, se estime necesario, la Secretaría podrá autorizar más estaciones que las indicadas en el inciso anterior.*
- c) A la persona que obtenga un certificado de clase Novata o restringida se le otorgará solamente permiso para instalar una estación fija.*

Para la operación y buen funcionamiento de la estación e instalaciones, deberá fungir como responsable un aficionado con certificado de aptitud clase I o II.

El acceso a las estaciones repetidoras deberá ser libre en todo tiempo, sin restricciones de ninguna especie, a todo aficionado que cuente con certificado expedido por la Secretaría.

ARTÍCULO 20.- Para la obtención de los permisos de instalación y operación deberán cumplirse los requisitos que señale la Secretaría, entre los cuales podrá incluirse la documentación que muestre las características técnicas de la estación que se pretenda instalar. Este requisito es indispensable para las estaciones a que se refiere el inciso c) del Artículo 19. No se podrán instalar accesorios que modifiquen su funcionamiento, sin contar con la autorización previa de la Secretaría.”¹⁵

4.1.3 Asignación de frecuencias VHF/UHF (Región 2)

La unión internacional de radioaficionados es el encargado de emitir el plan de bandas de frecuencias para la región 2, que es a la que pertenece México y asigna el espectro radioeléctrico para distintas aplicaciones.

Plan de bandas de IARU región 2

Desde el 27 de septiembre de 2013, entro en vigor un plan de frecuencias emitido por la IARU para la región 2, al que pertenece México y en el cual se organiza el uso eficiente de las bandas, al mismo tiempo que está en armonía con el plan de bandas de otras regiones es decir región 1 y región 3 en las cuales está dividido el mundo de acuerdo con la UIT y la IARU. A continuación se presentan algunas de las tablas de este plan de frecuencias.

¹⁵ Reglamento para instalar y operar estaciones radio eléctricas del servicio de aficionados

Dentro del plan de bandas de IARU, se encuentran varias tablas que indican las aplicaciones que corresponden a cada rango de frecuencias, así como modo de operación y ancho de banda. La tabla 4.4, corresponde a la banda de 2 metros (VHF), la tabla 4.5, corresponde a la banda de 70 centímetros (UHF) y la tabla 4.6 corresponde a la banda de 13 centímetros (UHF). Se muestra en los cuadros con línea punteada la frecuencia asignada a aplicaciones satelitales.

VHF – (Very High Frequency - Frecuencias muy altas)

Tabla 4.4 Asignación de frecuencias en VHF (2 Metros) [13]

Frecuencias (MHz)	BW (Hz)	Modo	Aplicaciones y observaciones
144.000-144.025	2700	Todos los modos	Satélites (Nota 1)
144.000-144.110	500	CW	TLT y señales débiles
144.110-144.150	2700	CW, DM	TLT y señales débiles
144.150-144.180	2700	CW, DM, SSB	Señales débiles
144.180-144.275	2700	CW, SSB	Señales débiles, QRG de llamada (exclusiva) 144.200 MHz
144.275-144.300	500	CW	Radiofaros
144.300-144.360	12000	Todos los modos	
144.360-144.400	12000	DM	ACDS, Centro de Actividad APRS 144.390 MHz
144.400-144.500	500	CW, DM	Radiofaros, ACDS (radiofaros digitales) (Nota 2)
144.500-144.600			Opción local
144.600-144.900	12000	FM, DV	Entrada de Repetidoras(exclusiva) (salidas +600 kHz)
144.900-145.000	12000	FM, DV	Señales débiles
145.000-145.100	12000	Todos los modos	ACDS, IVG (canales de 10 kHz) (Nota 3)
145.100-145.200			Opción local
145.200-145.500	12000	FM, DV	Salida de Repetidoras (entradas -600 kHz)
145.500-145.790	12000	Todos los modos	
145.790-145.800			Banda de protección, transmisión no permitida
145.800-146.000	12000	Todos los modos	Satélites (exclusivo)
146.000-146.390	12000	FM, DV	Entrada de Repetidoras (exclusivo) (salidas +600 kHz) (canales entre 146.01-146.37 MHz)
146.390-146.600	12000	FM, DV	QRL de llamada FM 146.520 MHz
146.600-146.990	12000	FM, DV	Salida de Repetidoras (entradas -600 kHz) (último canal 144.970 MHz)
146.990-147.400	12000	FM, DV	Entrada de Repetidoras (exclusivo) (salidas +600 kHz) (primer canal 147.000 MHz)
147.400-147.590	12000	FM, DV	
147.590-148.000	12000	FM, DV	Salida de Repetidoras (entradas -600 kHz)

Notas

1. “Los diseñadores y operadores de satélites que utilizan este segmento no deben transmitir abajo de 144.0025 MHz, a modo que haya una banda necesaria de guarda en el extremo inferior de la banda. “¹⁶

UHF – (Ultra High Frequency - Frecuencias Ultra Altas)

Tabla 4.5 Asignación de frecuencias en UHF (70 cm) [13]

Frecuencias (MHz)	BW (Hz)	Modo	Aplicaciones y observaciones
420.000-426.000		ATV	Repetidoras ATV o simplex con 421.25 MHz portadora de video, enlaces de control y experimental
426.000-432.000		ATV	ATV simplex con 427.25 MHz frecuencia portadora de video (Nota 1)
432.000-432.025	500	CW	TLT
432.025-432.100	500	CW, DM	TLT y señales débiles
432.100-432.300	2700	CW, SSB	Señales débiles, QRG de llamada SSB/CW 432.1 MHz
432.300-432.400	500	CW	Radiofaros
432.400-432.420	2700	CW, DM	Radiofaros, ACDS (radiofaros digitales)
432.420-433.000	2700	CW, SSB, DM	
433.000-433.050	12000	DM	ACDS
433.050-433.100	12000	Todos los modos	IVG
433.100-435.000			Opción local
435.000-438.000	12000	Todos los modos	Satélites (exclusivo)
438.000-450.000			Opción local (Nota 1)

Nota

1. En los países donde el espectro de 430-450 MHz no está completamente disponible para radioaficionados, los segmentos 430-432 MHz y 438-450 MHz pueden utilizarse según opciones locales.

¹⁶ Plan de bandas de IARU región 2 tomada de: <http://www.iaru-r2.org/documents/explorer/files/Plan%20de%20bandas%20%7C%20Band-plan/R2%20Plan%20de%20Bandas%202013.pdf>

Tabla 4.6 Asignación de frecuencias UHF (13 cm) [13]

Frecuencias (MHz)	BW (Hz)	Modo	Aplicaciones y observaciones
2300.000-2303.000	1 MHz	Todos los modos	Análogo y Digital, incluyendo <i>full duplex</i> ; apareado con 2390 – 2393 MHz
2303.000-2303.750	50 kHz	Todos los modos	Análogo y Digital, apareado con 2393 - 2393.750 MHz
2303.75-2304.000	3000	CW, SSB, DM	Señales débiles
2304.000-2304.100	3000	CW, SSB, DM	TLT y señales débiles
2304.10-2304.300	3000	CW, SSB, DM	Señales débiles. QRG de llamada 2304.100 MHz
2304.300-2304.400	3000	CW, DM	Radiofaros, ACDS (radiofaros digitales)
2304.400-2304.750	6000	CW, SSB, DM, NBFM	Señales débiles
2304.750-2305.000	50 kHz	Todos los modos	Análogo y Digital, apareado con 2394.750 – 2395 MHz
2305.000-2310.000	1 MHz	Todos los modos	Análogo y Digital, apareado con 2395 – 2400 MHz
2310.000-2390.000			Opción local
2390.000-2393.000	1 MHz	Todos los modos	Análogo y Digital, incluyendo <i>full duplex</i> ; apareado con 2300- 2303 MHz
2393.000-2393.750	50 kHz	Todos los modos	Análogo y Digital, apareado con 2303 - 2303.750 MHz
2393.750-2394.750		Todos los modos	Experimental
2394.750-2395.000	50 kHz	Todos los modos	Análogo y Digital, apareado con 2304.750 – 2305 MHz
2395.000-2400.000	1 MHz	Todos los modos	Análogo y Digital, incluyendo <i>full duplex</i> ; apareado con 2305- 2310 MHz
2400.000-2410.000	6000	Todos los modos	Satélites
2410.000-2450.000	22 MHz	Todos los modos	Aplicaciones de banda ancha

275 GHz hasta 3000 GHz

“La UIT no ha asignado este segmento a ningún servicio de radio, pero algunas administraciones han protegido aplicaciones pasivas en porciones entre 275 y 1000 GHz (radioastronomía, servicio de exploración de la Tierra por satélite y servicio de investigación espacial). Ha habido experiencias de los radioaficionados en 322 GHz, 403 GHz y 411 GHz. Los experimentadores deben consultar las reglas locales antes de iniciar la actividad.”¹⁷

4.1.4 Modos de operación comunes (Uplink-subida/Downlink-bajada)

El modo en los satélites, representa la banda que se está utilizando para trabajar con el satélite. La banda que se utiliza en el Uplink o subida, es para transmitir de la estación

¹⁷ Plan de bandas de IARU región 2 tomada de: <http://www.iaru-r2.org/documents/explorer/files/Plan%20de%20bandas%207C%20Band-plan/R2%20Plan%20de%20Bandas%202013.pdf>

terrena al satélite y el Downlink o bajada es en la que el satélite transmite y la estación terrena recibe la información.

Tabla 4.7 Modos de operación [39]

Modo	Uplink	Downlink
A	2 metros (145 MHz)	10 metros (29 MHz)
B	70 cm. (435 MHz)	2 metros (145 MHz)
J	2 metros (145 MHz)	70 cm. (435 MHz)
K	15 metros (21.2 MHz)	10 metros (29 MHz)
L	23 cm. (1.2 GHz)	70 cm. (435 MHz)
S	70 cm. (435 MHz)	13 cm. (2.4 GHz)
T	15 metros (21.2 MHz)	2 metros (145 MHz)

En los modos de dos letras como JA y JD se refiere al tipo de modo como J en Analógico o al modo J en Digital. Cuando el satélite trabaja con un modo compuesto, por ejemplo KA esto significa que se puede transmitir en 15 metros o en 2 metros y en ambos casos recibir en 10 metros. [39]

En la tabla 4.8 se muestran algunas frecuencias de RF, así como algunos de los ejemplos de las aplicaciones dependiendo de la banda de frecuencia, las frecuencias marcadas con el recuadro punteado en esta tabla, concuerdan con los valores presentadas en el plan de bandas de frecuencia de la región 2 emitida por IARU en las bandas de VHF y UHF dedicadas al servicio de radio aficionado.

Tabla 4.8 Frecuencias para radio aficionados ¹⁸

Frequency Band	Channel Allocations (GHz)		Examples
	Near Earth	Deep Space	
VHF/UHF	0.144 to 0.146 (amateur) 0.435 to 0.438 (amateur)	0.435 to 0.450 (forward) 0.390 to 0.405 (return)	Microsats, amateur radio satellites, Mars/Electra relay link
S-Band Military	1.7 to 1.9 (up) 2.2 to 2.3 (down) $B_N \leq 6$ MHz	N/A	Many missions
S-Band NASA	2.025 to 2.12 (up) 2.2 to 2.3 (down) $B_N \leq 6$ MHz	2.0 to 2.1 (up) 2.2 to 2.3 (down)	Many near-Earth and deep-space TT&C links and TDRSS multiple access links. Note: S-band not supported for future deep space missions
C-Band Commercial	3.7 to 4.2 (down) 5.925 to 6.425 (up)	N/A	Communications satellites
X-Band Earth Science	8.0 to 8.4 (down) $B_N \leq 400$ MHz	N/A	Landsat, RADARSAT
X-Band Space Science	8.4 to 8.45 (down) $B_N \leq 10$ MHz	8.45 to 8.5 (down)	Many near Earth and deep space missions.
K_u-Band Commercial	~11 (down) ~14 (up)	N/A	Direct broadcast. Specific frequencies vary by region.
K_u-Band TDRSS	13.9 (forward) 15.0 (return)	N/A	Shuttle and Space Station links to TDRSS. Note: frequency band being phased out for space missions.
K_s-Band Commercial	17.7 to 20.2 (down) 27.5 to 30.0 (up)	N/A	Direct broadcast. Fixed Satellite Service.
K_s-Band TDRSS and Lunar	22.6 to 23.6 (forward) 25.2 to 27.2 (return) 40 to 40.5 (forward) 37 to 38 (return)	N/A	High data rate links through TDRSS. Lunar trunk link.
K_s-Band Deep Space	N/A	34.2 to 34.7 (down) 31.8 to 32.3 (up) 37 to 38 (return) 40 to 40.5 (forward)	Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) high data rate planetary science link. Deep space trunk link.

¹⁸ James R. Wertz, David F. Everett. (2011). Space Mission Engineering: The new SMAD. USA: Microcosm Press.

Capítulo 5:

***DESARROLLO DE PROPUESTA DE LA ESTACIÓN
TERRENA PARA LA OPERACIÓN DE SATÉLITES
LEO***

5.1 Requerimientos y Necesidades Técnicas

El centro de Alta Tecnología (CAT) de la facultad de ingeniería de la UNAM, se localiza en Juriquilla en el estado de Querétaro. En este centro se están desarrollando proyectos satelitales con fines científicos tales como: CONDOR UNAM-MAI, QUETZAL y Ulises 2.0. Dichos proyectos demandan para su operación la infraestructura necesaria para recibir su telemetría y enviar comandos desde tierra.

La estación terrena que se propone implementar, trabajará en las bandas de frecuencia UHF/VHF para bajar telemetría científica y de servicio al igual que contar con la capacidad de enviar comandos para un posible cambio en los modos de operación de los instrumentos de carga útil o de servicio de abordaje del satélite.

Los equipos instalados en la estación terrena deben ser suficientemente sensibles para recibir señales que serán transmitidas por ejemplo con 1.0 [watt] de potencia desde el satélite hacia la tierra y ser capaces de procesar dicha información.

En la figura 5.1, se muestran algunos elementos básicos que forman parte de las primeras estaciones terrenas operando en 9600 Baudios en FSK (*Frequency Shift Keying-Modulación por variación de frecuencia*).

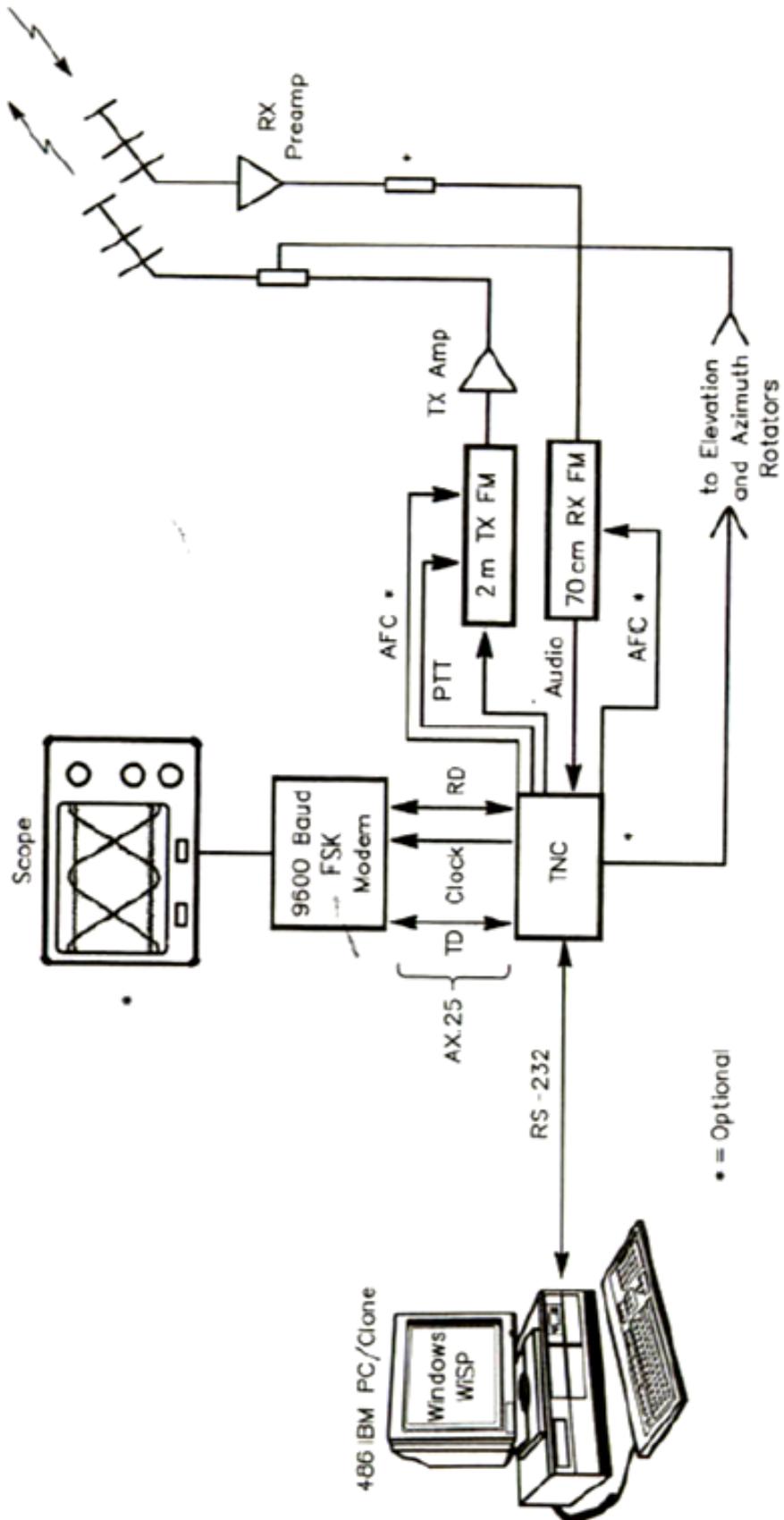


Figura 5-1 Estación terrena básica operando a 9600 Baudios

La Figura 5.2 muestra un ejemplo de una estación terrena operando en 1200 Baudios en modulación PSK (*Phase Shift Keying - Modulación por desplazamiento de fase*).

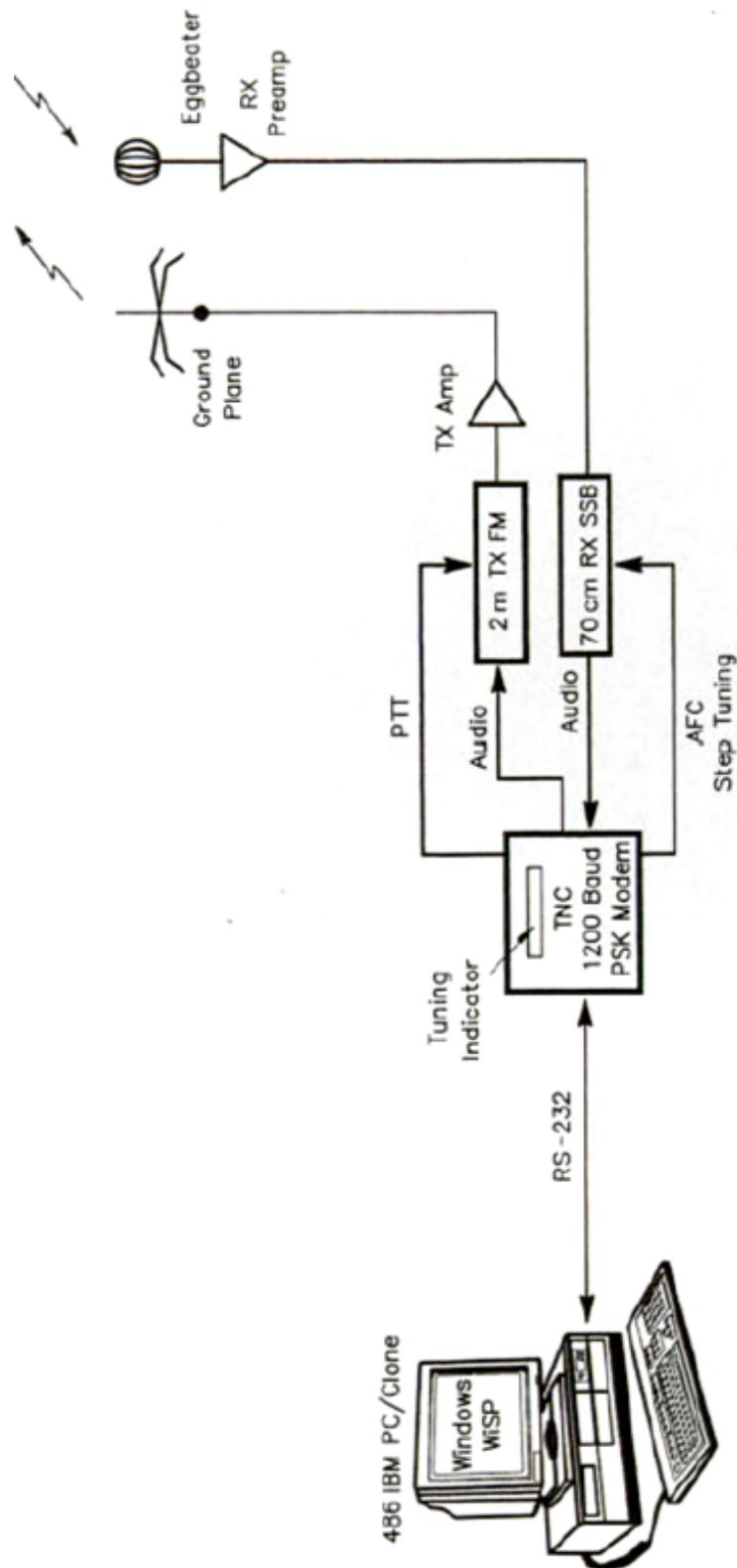


Figura 5-2 Estación terrena básica operando a 1200 Baudios

En la Figura 5.3 se ilustra un esquema general de una estación terrena más moderna empleada para trabajar en las bandas de frecuencias VHF/UHF.

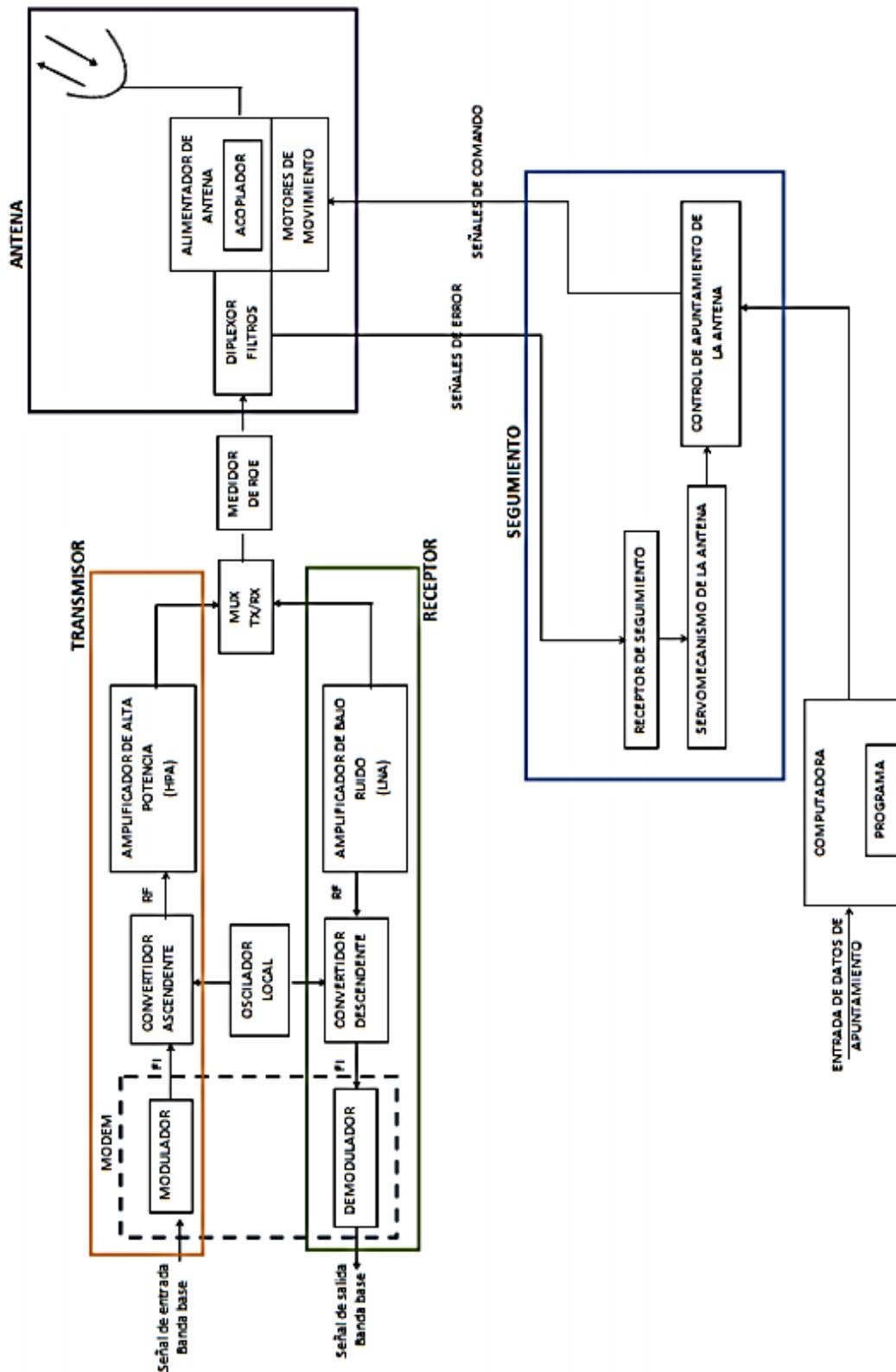


Figura 5-3 Estación terrena actual para operar en VHF/UHF

La mayoría de las estaciones terrenas que podemos encontrar en la actualidad están formadas por moduladores, demoduladores, convertidores de frecuencia ascendente y descendente, osciladores locales, amplificador de potencia, pre-amplificador de bajo nivel de ruido, multiplexores, alimentadores, filtros, antenas y diplexores, medidores de ondas estacionarias (ROE) (sirve para acoplar la antena y las líneas de transmisión), cables de conexión, alimentadores, programas para seguimiento de satélites, etc.

La estación terrena que se estará implementando en el Centro de Alta Tecnología (CAT) será utilizada para la operación de satélites, es decir para transmitir y/o recibir información del satélite CONDOR, Quetzal, Ulises 2.0, etc. La información a transmitir desde el satélite será recibida por las antenas que forman parte de la estación terrena y puede ser de diferentes tipos tales como: Código Morse, voz o lenguaje digital de computadora.

Es importante considerar que a nivel mundial los tipos de transmisión analógicos más utilizados con estas estaciones terrenas son FM, SSB (Single-Sideband Modulation- Banda lateral única, que es el resultado de una señal doble banda lateral y pasarla a través de un filtro paso altas o paso bajas) y CW (continuous wave- onda continua), mientras que los tipos digitales son RTTY, radio paquete (AX.25) y SSTV. [44]

RTTY

El RTTY o Radio Teletipo, es un modo digital usado por radio aficionados, usa un código que emplea la representación de signos con la unión de Bytes. La velocidad de transmisión se expresa en baudios (impulso x segundo). Las velocidades de transmisión suelen ser: 45, 50, 75, 100, 110, 200 baudios. [43]

10 baudios = 10 impulsos por segundo

1 carácter = 7,5 impulsos

SSTV

La transmisión de imágenes por radio. Esta modalidad de transmisión se basa en la transformación de una imagen (frame) en una serie de líneas que se transmiten en forma de pulsos similar a todos los métodos de televisión. [43]

Radio paquete

La palabra PACKET significa datos enviados en pequeños 'paquetes' o grupos de información, usa el protocolo AX.25. Este es un sistema de transmisión de datos, libre de errores y apto para transferir gran cantidad de datos. Permite la operación en "full-duplex". [43]

En la Figura 5.4 aparece un ejemplo de antena típica para operar en VHF/UHF para operar satélites en órbita baja (LEO).

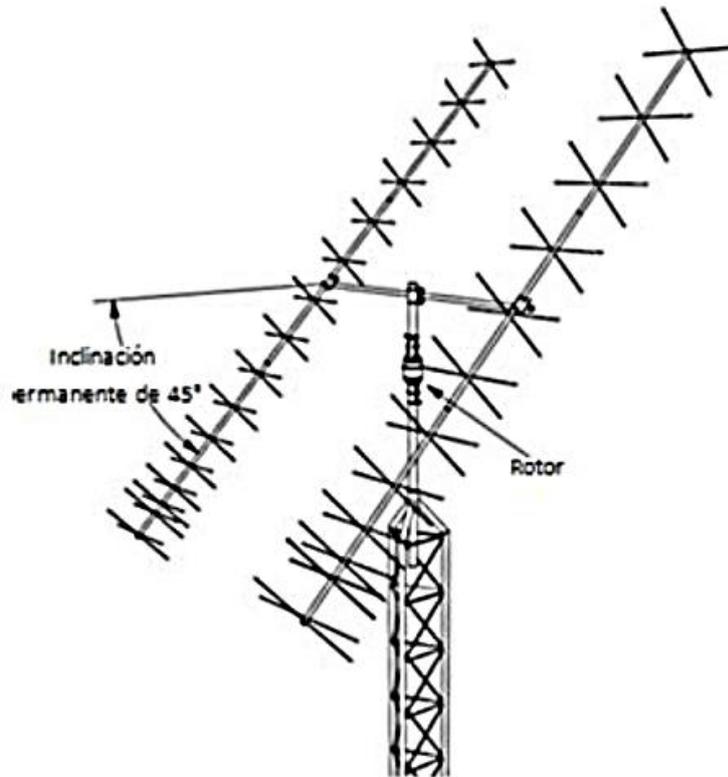


Figura 5-4 Antena en torre para operar en VHF/UHF

La estación terrena para operar satélites en órbita baja (LEO) desempeñara actividades como: seguimiento o rastreo del satélite, operaciones de telemetría para conocer el estado de operativo del satélite y de cada una de sus partes, comando y control del satélite y procesamiento de datos.

5.2 Cálculos de Radio Enlace (Satélite - Tierra / Tierra - Satélite)

La comunicación entre la estación terrena y el satélite, depende de la radiación emitida de las antenas hacia el satélite, para lograr un enlace satelital es necesario cumplir con los requisitos de la red de comunicación.

Algunos factores que deben ser considerados, son: las características de los equipos para las estaciones terrenas, los transpondedores, el medio de propagación, la distancia entre la estación terrena y el satélite, el ruido, la absorción por radiación, la polarización, des apuntamiento de las antenas y las interferencias. La banda de frecuencias utilizada puede ayudar a que algunos efectos tengan menor importancia. [1]

La señal recibida por las antenas receptoras en la estación terrena, debe tener una relación de la potencia de la señal al ruido acumulado adecuada, a esto se le conoce como:

$$\text{relación señal a ruido} = \frac{S}{N} \quad \text{Ec. 5.1}$$

En esta relación, son incluidas todas las fuentes de interferencia durante la propagación de la señal. En la figura 5.5 se muestra una configuración básica de una enlace satelital. [20]

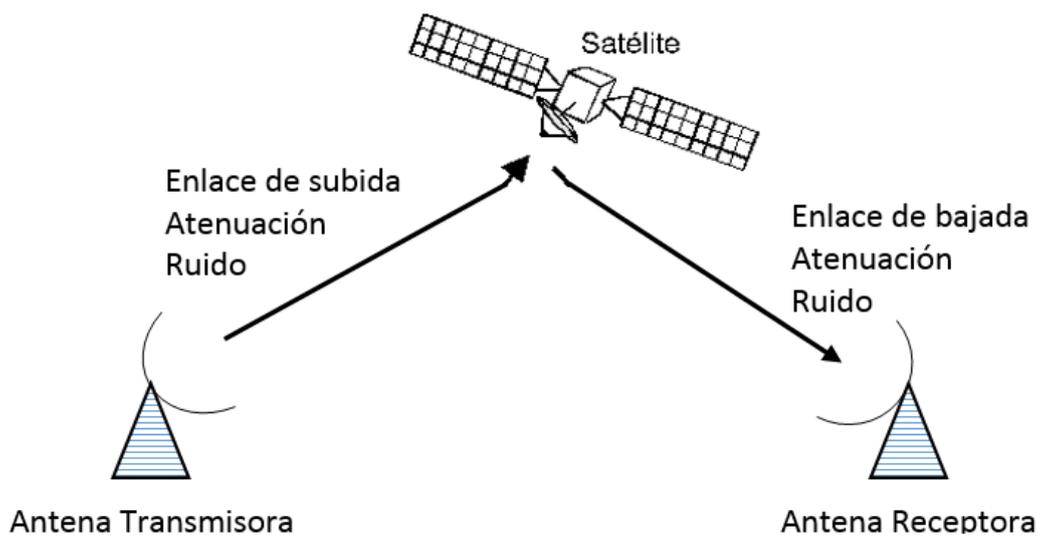


Figura 5-5 Enlace satelital básico

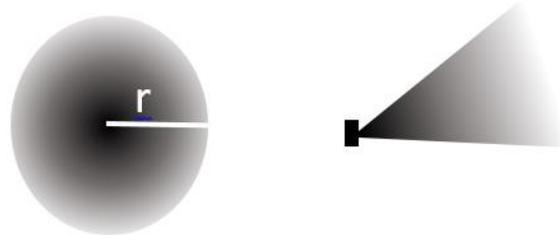
Durante el trayecto de la señal, desde la antena transmisora de la estación terrena hacia la antena receptora en el satélite en el ambiente pueden encontrarse condiciones de casi vacío, con precipitación de agua, con partículas sólidas (nieve o arena) o con algunos objetos de mayor tamaño, esto puede ocasionar modificaciones en la propagación de las ondas puesto que la energía de la señal transmitida puede ser absorbida, desviada, dispersada o reflejada. La dispersión, es el efecto que causa la mayor reducción en potencia de las señales. [18]

5.2.1 Ecuaciones básicas para cálculos de enlace

Al recibir una señal, la antena receptora recibe una cantidad de densidad de flujo de potencia. Cuando la señal fue transmitida con una antena isotrópica, los factores considerados para obtener el valor de dicha densidad son: la potencia transmitida y el área que puede ser definida como $4\pi r^2$, donde r es el radio de la esfera donde se concentra el total de la densidad de flujo.

Si consideramos que se utiliza una antena direccional con ganancia G_T para transmitir, la densidad de flujo es amplificada por dicha ganancia y el valor puede ser obtenido con ayuda de la ecuación 5.2, en la figura 5.6 se muestra la distribución de la densidad de potencia en una antena isotrópica y en una direccional con ganancia [20]

$$\text{densidad de flujo} = F_d = \left(\frac{P_T}{4\pi r^2} \right) G_T \left[W/m^2 \right] \quad \text{Ec. 5.2}$$



Antena isotrópica Antena direccional con ganancia

Figura 5-6 Radiación en antena isotrópica y en antena direccional

En la ecuación de la densidad de flujo, se observa el producto $P_T * G_T$, este es el valor de la potencia isotrópica radiada efectiva o equivalente es el concepto conocido como PIRE. En la ecuación 5.3, se muestra como obtener el valor de la PIRE. [18]

$$PIRE = P_T * G_T \quad [W] \quad \text{Ec. 5.3}$$

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

donde:

P_T = Potencia transmitida

G_T = Ganancia de la antena transmisora

El valor de la potencia recibida en la estación terrena, depende del área efectiva de la antena y esta puede ser obtenida con ayuda de la ecuación 5.4 siendo esta su fórmula universal en función de la ganancia y la longitud de onda. [18]

$$A_e = \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \quad \text{Ec. 5.4}$$

donde:

G_R = ganancia de la antena receptora

λ = longitud de onda a la frecuencia central

5.2.2 Pérdidas en el espacio libre

Las pérdidas de potencia más grandes en un enlace satelital, se deben a la frecuencia de operación y a la distancia que recorre la señal entre la antena transmisora y la receptora. Estas pérdidas ocurren por el simple hecho de transmitir una onda en el espacio y son conocidas como *atenuación por propagación en el espacio libre*. Con ayuda de la ecuación 5.6, podemos obtener el valor de estas pérdidas. [18][20]

$$l_{el} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad \text{Ec. 5.5}$$

La ecuación expresada en términos de frecuencia queda como:

$$l_{el} = \left(\frac{4\pi d f}{c}\right)^2$$

Donde:

d = Distancia entre el satélite y la estación terrena

λ = Longitud de onda de la señal transmitida

f = Frecuencia de operación

c = Velocidad de la luz = 3×10^8 m/s

Una forma simplificada de conocer el valor de las pérdidas en espacio libre de un satélite de **órbita baja** (LEO), es conociendo el valor de frecuencia f y de la distancia d , utilizando la ecuación 5.7 [26]

$$L_{el} = 32.4 + 20\log(f) + 20\log(d) \quad \text{Ec. 5.7}$$

Donde:

f = Frecuencia en [MHz]

d = Distancia entre la estación terrena y el satélite en [Km]

Otras pérdidas de potencia en la señal, puede ser la absorción de la señal durante su propagación esto ocurre en la parte baja de la atmósfera y las causas pueden ser fijas como la frecuencia de la portadora, ángulo de elevación de la antena y altura de la estación terrena con respecto al nivel del mar y variables como el vapor en el aire. Estas pérdidas se consideran en una transmisión con cielo despejado.

Las pérdidas por absorción pueden ser ignoradas en enlaces con frecuencia de hasta 10 GHz, esto sucede generalmente con enlaces para satélites de órbita baja, que utilizan frecuencias por debajo de los 10 GHz, por lo que no es necesario considerar estas pérdidas en sus cálculos de enlace. [18]

Refracción y centelleo es otra causa de pérdida de potencia en la señal de enlace entre estación terrena y satélite, este fenómeno produce múltiples trayectorias lo que puede

ocasionar que la señal sea cancelada parcialmente o reforzada. Es común en regiones tropicales, en verano y con clima nublado. Es también ocasionado por utilizar frecuencias altas, es decir mayores a 11 GHz lo que ocasiona que en frecuencias de VHF y UHF, estas pérdidas no sean consideradas debido a que sus efectos pueden ser despreciados en los cálculos de enlace satelital. [18]

La ionosfera es una capa inestable de partículas ionizadas es decir, cargadas eléctricamente por la radiación solar y pueden producir en las ondas con polarización lineal una rotación de la polarización, conocida como rotación de Faraday. Este efecto ocurre dentro de la banda de frecuencias de UHF (300 MHz -1 GHz), para disminuir este efecto, se recomienda utilizar polarización circular, también puede ser compensado ajustando la polarización en la estación terrena. [18][20]

En la figura 5.7 se muestran las capas de la ionosfera que la señal debe atravesar para llegar al satélite. Por la noche las capas D y E desaparecen mientras las capas F1 y F2, se unen para formar una sola región F.

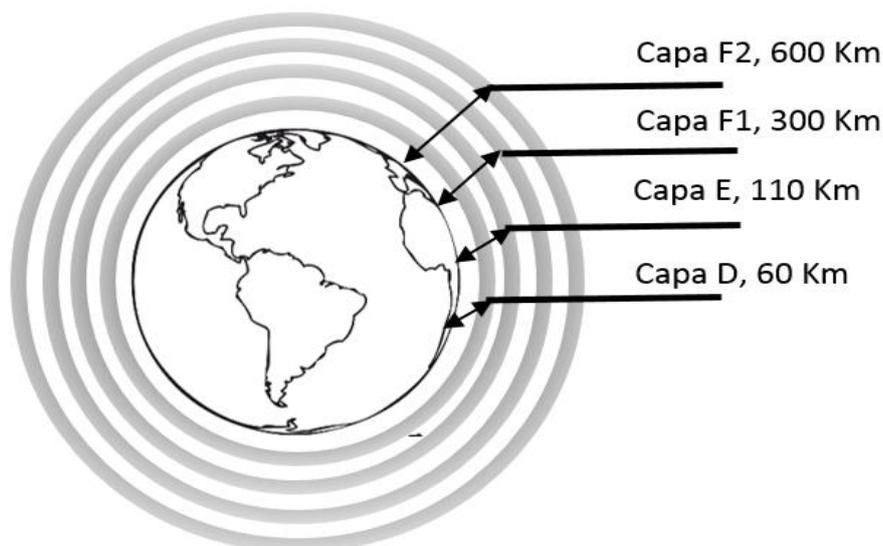


Figura 5-7 Capas de la ionosfera y sus correspondientes alturas

El efecto Faraday, consiste en la desviación del campo eléctrico de una señal que tiene polarización lineal y ocurre cuando la onda de radio atraviesa la ionosfera y se depende de la frecuencia de la señal, la interacción entre las partículas cargadas de la ionosfera y fuerza y orientación del campo magnético terrestre en la trayectoria, también debe ser considerado el grado de ionización en la ionosfera y esto, depende de la altura, de la estación del año y de la actividad solar, a mayor grado de ionización mayor será la rotación de Faraday. [20][26]

En la imagen 5.8, se muestra el efecto Faraday en una señal transmitida.

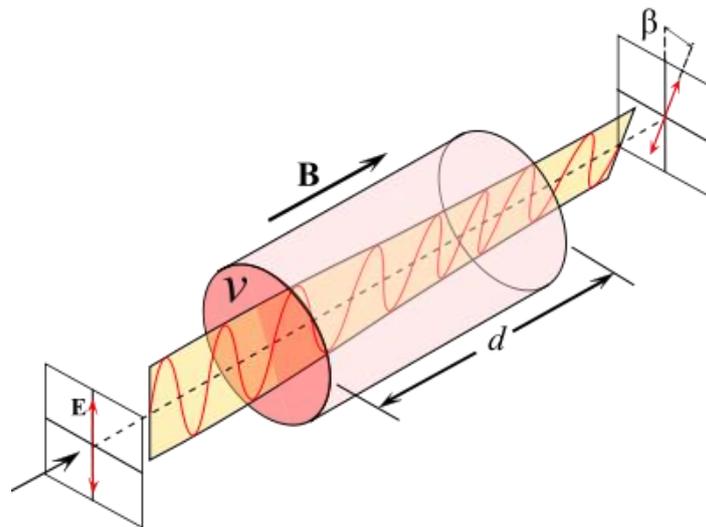


Figura 5-8 Rotación Faraday [21]

La desviación del campo eléctrico de la señal, puede ocasionar mayor desvanecimiento de potencia, si en las dos antenas es decir en la del satélite y en la de la estación terrena, se utiliza polarización lineal (horizontal o vertical) ya que esta provoca que la potencia que llega a la antena receptora disminuya debido a que la potencia transmitida es dividida en dos componentes además de ocasionar que exista interferencia entre señales.

La pérdida de potencia que sufre la señal, depende del ángulo β formado por la rotación de Faraday, el ángulo puede ser calculado con la ecuación 5.8 y la pérdida de potencia con la ecuación 5.9. [21][20]

$$\beta = VBd \quad \text{Ec. 5.8}$$

Donde:

β = Ángulo ocasionado por la rotación de Faraday en radianes

V = Constante de Verdet del material

B = Flujo de densidad magnética en la dirección de propagación

d = Distancia recorrida en metros

$$E_{final} = E \cos \beta \quad \text{Ec 5.9}$$

Donde:

E = campo eléctrico final

E = magnitud de campo eléctrico original

β = ángulo ocasionado por la rotación de Faraday

En el caso de los satélites de órbita baja, **las pérdidas por polarización teóricas, se estiman en 3 dB**. Los cálculos de enlace son realizados tomando en cuenta las

características de los satélites y estaciones terrenas en el peor caso, esto es para asegurar que en las peores condiciones se obtendrá una señal con potencia suficiente para que la información recibida pueda ser procesada. [18]

5.2.3 Pérdidas por apuntamiento

El error de apuntamiento, se debe a que en la práctica la orientación de los ejes del haz de las antenas no está totalmente alineada, esto se debe a los movimientos del satélite y a algunos errores de orientación en las antenas de la estación terrestre, causando que en el enlace se pierda parte de la señal. Estas pérdidas, pueden ser calculadas si se trata de satélites geoestacionarios, sin embargo para satélites de órbita baja, estas pérdidas tienen un **valor teórico de 1 dB**. En la figura 5.9 se ejemplifica el caso ideal y real de apuntamiento. [3]

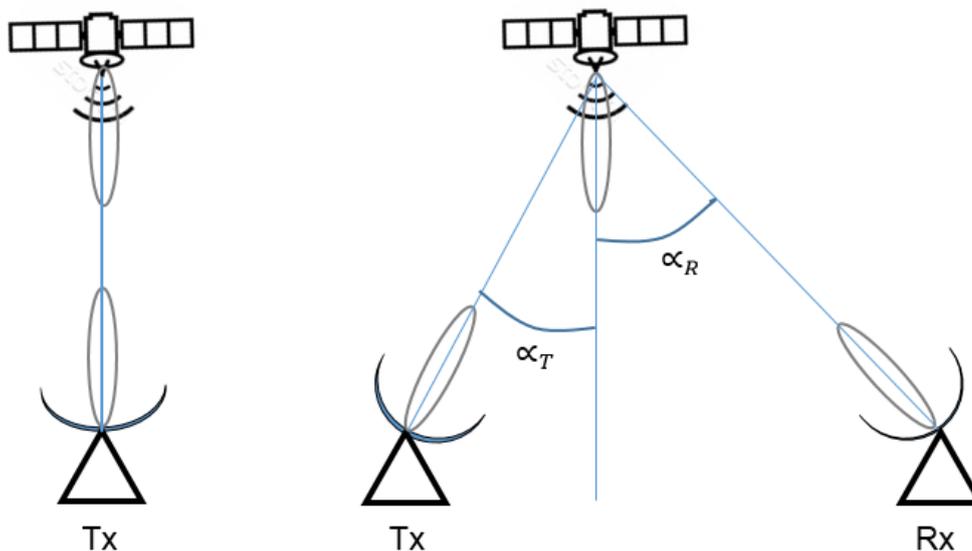


Figura 5-9 Caso ideal y real de apuntamiento de antenas

5.2.4 Cálculo de ruido en una antena del enlace satelital

El ruido, es considerado como cualquier señal no deseada con frecuencias dentro de la banda útil del sistema de comunicación. En el equipo receptor la mayor fuente de ruido eléctrico es conocida como ruido térmico y es ocasionado por el movimiento térmico aleatorio de los electrones dentro de los dispositivos.

Es debido al ruido, que es necesario tener en la antena receptora de la señal un valor mínimo que garantice que la relación entre la señal portadora y el ruido es adecuada para recibir la información. [20]

La temperatura de ruido, es un concepto que define la potencia de este, es decir el ruido presente en un punto de recepción de la señal. "El ruido proveniente del espacio

introducido por una antena a un receptor puede considerarse equivalente al originado por una resistencia a una temperatura T tal que produzca la misma potencia en la misma anchura de banda, debido a que en ambos casos está constituido por energía incoherente estadísticamente distribuida.”¹⁹

El valor numérico de la potencia de ruido térmico, puede ser obtenido con ayuda de la ecuación 5. 10. Si se desea obtener el valor de N en watts, deben de usarse T en Kelvin y B en Hertz. [26]

$$N = kT_e B \quad \text{Ec. 5.10}$$

donde

N = potencia N de ruido producido por una fuente de ruido termico

$k = 1.38054 \times 10^{-23}$ [J/K], constante de Boltzman

T_e = temperatura equivalente de ruido

B = ancho de banda del receptor [Hz]

Temperatura de ruido, una resistencia dentro de un circuito eléctrico, con movimiento aleatorio de electrones en su interior, es una fuente de ruido y su valor puede ser calculado con la ecuación 5.9 considerando a T_0 como 290kelvin siendo esta la temperatura ambiente resultado de sumar 17° Celsius más 273°, para obtener el valor el Kelvin.

Un amplificador puede ser representado por una resistencia que genere la misma potencia de ruido, la temperatura de ruido del amplificador será la temperatura equivalente de la resistencia que genero la misma potencia de ruido. Se puede calcular el ruido equivalente, considerando a T_e como la suma de las temperatura recibida T_R y la temperatura del cielo T_S que es igual a 150 K. la T_R puede ser calculada con la ecuación 5.7

$$T_R [K] = 290 \left(10^{\frac{F_T}{10}} - 1 \right) \quad \text{Ec. 5.10}$$

$$T_e = T_R + T_S \quad \text{Ec. 5.11}$$

Donde:

T_R = temperatura recibida

F_T = figura de ruido de la antena receptora

T_e = temperatura equivalente

T_S = temperatura del cielo

La antena receptora de la estación terrena, es el elemento que recibe una gran cantidad del ruido total del sistema. Este ruido depende de la frecuencia de operación, de las condiciones de la atmosfera y del ángulo de elevación de la antena en la estación

¹⁹ Carlos Rosado. (1999). Comunicación por satélite, principios tecnologías y sistemas. México D.F.: limusa.

terrena. Este elemento es el que introduce la mayor parte de ruido debido a que capta el ruido proveniente de diferentes fuentes y con distintas intensidades con el lóbulo principal, los lóbulos laterales y el lóbulo posterior.

Algunos ejemplos son: el ruido de la atmósfera, ruido cósmico que proviene de radiaciones residuales desde el origen del universo y galáctico que proviene de nuestra galaxia además del ruido del sol y de la luna. En la figura 5.10, se muestran algunas fuentes de ruido.

“La temperatura aparente cambia con la frecuencia y con el ángulo de elevación. Debajo de 1GHz, el ruido galáctico aumenta muy rápidamente con la reducción de la frecuencia, y la temperatura de ruido del espacio es mucho mayor que la temperatura de ruido del equipo receptor, pero es superado por el ruido artificial generado por el hombre en las zonas pobladas. A 1 GHz o un poco más la componente predominante puede ser el ruido galáctico o, según los lóbulos laterales de la antena, la causada por la superficie de la tierra.”²⁰

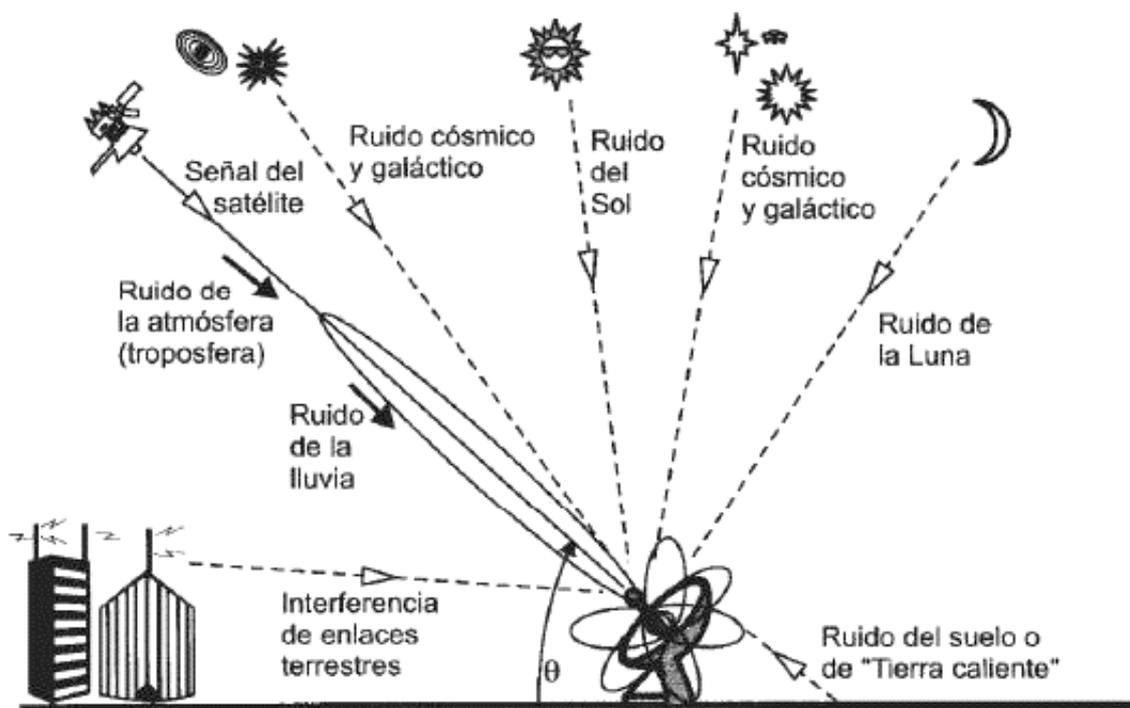


Figura 5-10 Fuentes de ruido interactuando con una antena [20]

²⁰ Ibid

Para conocer la **potencia total de ruido** se considera la temperatura de ruido y puede ser calculada como:

$$P_n[dBm] = 10 \log W_n[mW] = 10 \log(kT_e B) \quad \text{Ec. 5.12}$$

5.2.5 La línea de transmisión

La línea de transmisión será el medio para conducir la señal de radiofrecuencia (RF) desde el transmisor al receptor y la antena. La distancia entre estos dos puntos terminales de la línea determinará su longitud. Si la distancia es relativamente pequeña las pérdidas serán menores.

El tipo más común utilizado en las estaciones terrenas para operar satélites de órbita baja (LEO) es el cable coaxial. El cable coaxial está formado por un conductor central, el cual puede ser hilo o alambre sólido, rodeado por un conductor externo concéntrico con un aislante dieléctrico entre los conductores.

El conductor exterior puede ser de revestimiento de alambre trenzado o funda metálica. En la Figura 5.11 se muestran tipos de cables coaxiales.

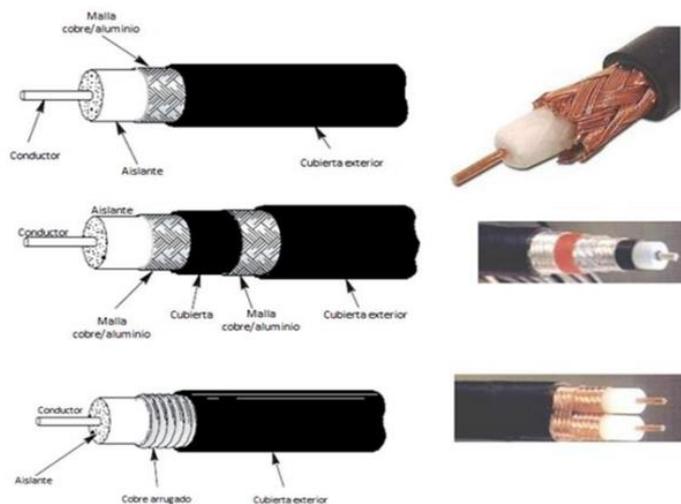


Figura 5-11 Tipos y composición de un cable coaxial

Los cables coaxiales, se emplean mucho en la práctica principalmente para la bajada de señales satelitales. El cable coaxial RG214 es muy utilizado en la instalación de las estaciones terrenas. Algunas características de este cable se muestran en la siguiente figura 5.12.

Construction & Dimensions



1	Inner conductor	Stranded silver plated copper
2	Dielectric	Solid PE
3	Braid	Silver plated copper
4	Sheath	PVC according the European Standard HD 624.

1.	Conductor Innenleiter - Conduttore Interno - Conducteur	
	Diameter:	7x 0.75 mm
2.	Dielectric Dielektrikum - Dielettrico - Diélectrique	
	Diameter:	7.2 mm ± 0.15 mm
3.	Outer Conductor Aussenleiter - Conduttore Esterno - Conducteur extérieur	
	Diameter screen:	8.55 mm ± 0.25 mm
	Coverage braid 1:	86 % ± 4 %
	Coverage braid 2:	90 % ± 4 %
4.	Jacket Aussenmantel - Guaina - Gaine	
	Diameter:	10.8 mm ± 0.2 mm

Figura 5-12 Características de cable coaxial RG214

5.2.6 Balance de potencia

En la ecuación 5.13, se muestra la potencia recibida en la antena receptora, considerando las pérdidas en potencia ocasionadas por la propagación de señal. [20]

$$P_R = P_T + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{el} \tag{Ec. 5.13}$$

donde

P_R = potencia recibida [dBm]

P_T = potencia transmitida [dBm]

G_{Tx} = ganancia de la antena transmisora (satélite)[dBi]

G_{Rx} = ganancia de la antena receptora (estacion terrena)[dB]

L_{el} = son las perdidas por propagación en el espacio libre [dB]

En la figura 5.13 se muestra el diagrama de un enlace desde el transmisor, pasando por los amplificadores, las antenas y el medio de transmisión, indicando la pérdida o ganancia de cada tramo dentro del enlace.

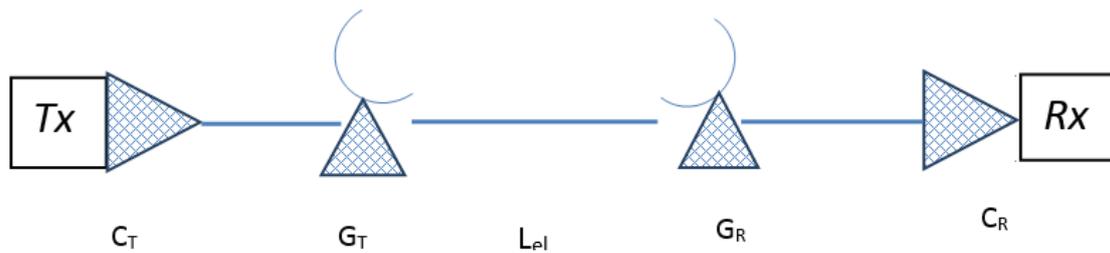


Figura 5-13 Ganancia y pérdida dentro de un enlace

Considerando todas las pérdidas y ganancias de los elementos que participan dentro de un enlace satelital, podemos obtener la relación señal a ruido de bajada de una señal SSB (en banda lateral única) de un enlace satelital con la ecuación. [22]

$$SNR = \frac{\text{Potencia de la señal recibida}}{\text{Potencia de ruido recibido}} = \frac{W_s}{W_n} \quad \text{Ec. 5.14}$$

$$SNR [dB] = 10 \log W_s - 10 \log W_n = P_s - P_n \quad \text{Ec. 5.15}$$

donde:

$P_s = P_R =$ potencia de la señal

$P_n =$ potencia de ruido

5.2.7 Cálculo del SNR del enlace de bajada

Para realizar estos cálculos, se utilizarán las ecuaciones vistas anteriormente y para los datos, se tomara como caso de estudio el Condor con algunos datos propuestos para este satélite. Algunos datos se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Datos de satélite y Estación terrena

Satélite	
Potencia transmitida	1 watt
Frecuencia de bajada	435.2 MHz
Altura =h	800 Km
Ganancia antena	10 dBi
Estación terrena propuesta	
Ángulo de elevación	5° (mínimo)
Ganancia antena receptora	15.5 dBi
SNR	>10 dB
Ancho de banda	50 KHz
Figura de ruido del sistema	2.2 dB
Temperatura del cielo T_s	150 K

$$SNR [dB] = 10\log W_s - 10\log W_n = P_R - P_n$$

Primero calculamos la distancia máxima entre el satélite y la estación con la ecuación 5.16

$$d_{max} = \sqrt{(R + h)^2 - R^2 \cos^2(\theta)} - \sin(\theta) \quad \text{Ec. 5.16}$$

Donde:

R = Radio medio de la tierra [6378 Km]

h = Altura del satélite sobre la tierra [800 Km]

θ = Ángulo de elevación mínimo de la estación terrena [5°]

$$d_{max} = \sqrt{(6378 + 800)^2 - 6378^2 \cos^2(5)} - \sin(5)$$

$$d_{max} = 2783.85 [Km]$$

Se calcula el valor de las pérdidas en el espacio libre, utilizando la distancia máxima, ya que en este caso, tendremos el mayor valor de pérdidas por propagación en el espacio libre:

$$L_{el} = 10\log \left(\frac{4\pi d_{max}}{\lambda} \right)^2$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]}{435.2 \times 10^6 [Hz]} = 0.689 [m]$$

$$L_{el} = 20\log \left(\frac{4\pi d_{max}}{\lambda} \right)$$

$$L_{el} = 20 \log \left(\frac{4\pi(278385) [m]}{0.689 [m]} \right)$$

$$\mathbf{L_{el} = 157.684 [dB]}$$

A continuación se obtiene el valor de la potencia recibida, considerando la potencia transmitida, la ganancia de la antena transmisora y receptora y las pérdidas por propagación en el espacio libre:

$$P_R = P_T + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{el}$$

$$P_R = 30 \text{ dBm} + 10 \text{ dBi} + 15.5 \text{ dBi} - 157.684 \text{ dB}$$

$$\mathbf{P_R = -102.184 dBm}$$

Para obtener potencia de ruido P_n :

$$N = kT_e B$$

$$T_e = T_R + T_S$$

$$T_R [K] = 290 \left(10^{\frac{F_T}{10}} - 1 \right)$$

$$T_R [K] = 290 \left(10^{\frac{2.2}{10}} - 1 \right) = 191 \text{ K}$$

$$T_e = 191 [K] + 150 [K] = 341 [K]$$

$$N = \left(1.38054 \times 10^{-23} \left[\frac{J}{K} \right] \right) * (341 [K]) * (50 [KHz])$$

$$P_n = 10 \log N = 10 \log(kT_e B) = 10 \log(k) + 10 \log(T_e) + 10 \log(B)$$

$$P_n = 10 \log(1.38054) + 10 \log(10^{-23}) + 10 \log(341) + 10 \log(50000)$$

$$\mathbf{P_n = -156.2822 dBm}$$

Finalmente la calidad de la señal medida con el SNR resulta:

$$SNR [dB] = P_R - P_n = -102.184 \text{ dBm} - (-156.2822 \text{ dBm})$$

$$\mathbf{SNR [dB] = 54.098}$$

El valor de SNR, la relación de señal a ruido en el enlace, indica que la calidad de la señal que llegó es buena. También cumple con la condición de ser mayor a 10 dB, esto para

asegurar que la señal pueda ser procesada y comprobar que los equipos que se proponen a continuación, tendrán un correcto funcionamiento en la estación terrena.

5.3 Selección de equipo para la estación terrena

La selección y cotización del equipo propuesto para ser instalado en la estación terrena que operará en las bandas de frecuencia VHF y UHF desde el CAT (Centro de Alta Tecnología) en Juriquilla, Querétaro fue considerando las características del enlace, como fueron las frecuencias de operación, la misión y la órbita en la que trabajarán los satélites. Incluyendo también las pérdidas de propagación, de los equipos y las ganancias de las antenas además de los costos, ya que se realizó un estudio para saber costos de diferentes proveedores así como actualidad en las antenas y equipos requeridos.

5.3.1 Subsistema de antenas tipo Yagi para las bandas VHF/UHF

En el caso de la instalación de una antena para la operación de satélites en órbita baja tales como el CONDOR, requiere de una correcta instalación y deberá de tomarse en cuenta la velocidad máxima del viento del lugar en donde se instalara la antena, peso y forma del arreglo de antenas, huella de la torre (cantidad de espacio sobre la tierra que es requerido para la instalación), tipo y altura de la torre en donde se colocaran las antenas, presupuesto con el que se cuenta para la instalación, el sitio de instalación debe estar libre de obstáculos como edificios, muros, ductos de PVC para los cables de señal y de RF.

Las antenas tipo Yagi seleccionadas por sus características, son el modelo 2MXP20 y 436CP30, en la figura 5.14 y 5.15 se muestran las antenas y en las tablas 5.2 y 5.3 algunas de sus características más importantes.

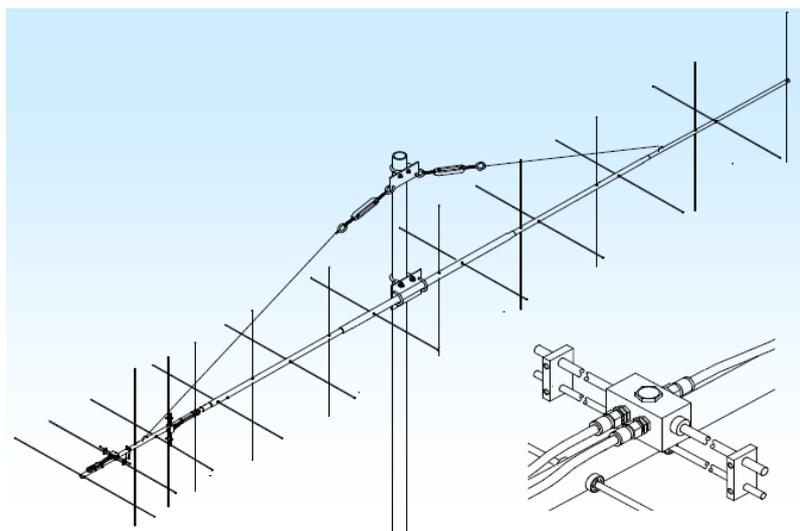


Figura 5-14 Antena modelo 2MXP20 y frecuencia 144 a 146 MHz

En la tabla 5.2, se muestran algunas de las características más importantes de la antena.

Tabla 5.2 Las características de la antena para VHF ²¹

Modelo	2MXP20
Rango de frecuencias	144 - 146 MHz
Ganancia	15.3 dBi
Front to back	25 dB típico
Ancho de haz	E = 30 ° H = 34 °
Impedancia de entrada	50 ohmios
Conector de entrada	"N" hembra
Manejo de potencia	2.5 kW
Radio de giro	146 "

Antena modelo No: 436CP30

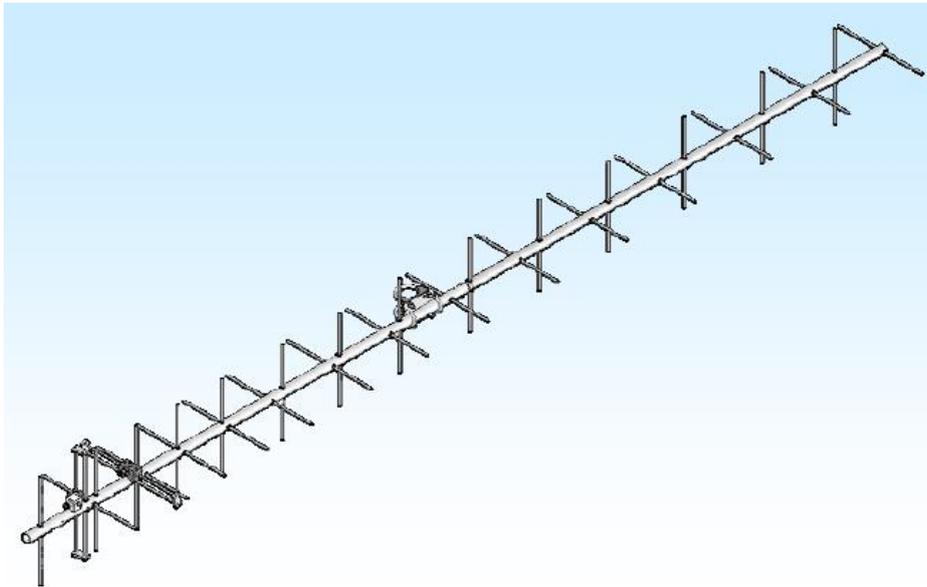


Figura 5-15 Antena modelo 436CP30 y frecuencia 432 a 440 MHz [72]

²¹ <http://www.ges.cz/sheets/2/2mXP20.pdf>

En la tabla 5.3, se muestran algunas de las características más importantes de la antena.

Tabla 5.3 Las características de la antena para UHF ²²

Modelo	436CP30
Rango de frecuencias	432 a 440 MHz
Ganancia	15.50 dBi
Front to back	18 dB Typical
Ancho de haz	30° circular
Impedancia de entrada	50 ohmios
Conector de entrada	“N” hembra
Manejo de potencia	600 Watts
Radio de giro	62-5 / 8 "

5.3.2 Trans-Receptor para operar en las bandas VHF/UHF

Se seleccionó el transceptor multi-banda TS-2000X debido a sus características, la parte frontal de este transceptor se muestra en la figura 5.16, enseguida se mencionan algunas de las características principales.



Figura 5-16 Transceptor modelo TS-2000X ²³

²² http://www.m2inc.com/pdf_manuals/436CP30.pdf

²³ <http://manual.kenwood.com/files/TS-2000-German.pdf>

CARACTERÍSTICAS [73]

- Operación de todos los modos en banda para radio aficionados de HF a 1,2 GHz (TS-2000/ TS-B2000Opcional) con funciones DSP.
- Unidades de Procesamiento de Señales Digitales (DSP) duales de alta velocidad.
- Frecuencias de filtro DSP ajustable.
- Control de Ganancia Automático (AGC) Digital de alta velocidad.
- Un segundo subreceptor independiente para las bandas de 144 MHz y 430 (440) MHz (modos FM y AM solamente).
- Un Sintonizador de Antena incorporado para la banda HF/ 50 MHz.
- Un TNC incorporado de 9600/ 1200 bps para operaciones de Sintonización de Grupos de Paquetes (P.C.T.) DX y Sky Command II+.
- Sintonización de Grupos de Paquetes (P.C.T.) DX para la búsqueda DX.
- Tecla de comunicación de Satélite Instantánea.
- Un filtro DPS extra fino de hasta 50 Hz para la operación CW.

5.3.3 Rotores para mover a las antenas

Para realizar una correcta elección de rotor para la antena, es necesario considerar la importancia de la exactitud de seguimiento, ya que existen rotores en los cuales es posible solo realizar el seguimiento y azimut y tener fijo el valor de elevación, así como es posible realizar el cambio en elevación de forma manual con roto en azimut. Los más precisos, son aquellos en los que se combina azimut y elevación ya que el seguimiento es más exacto y es posible tener mejor seguimiento del satélite desde la estación terrena.



Figura 5-17 Tipos de Rotores Azimut / Elevación

5.3.4 Unidad de control manual y remoto (Azimut / Elevación)

El YAESU G-5500, es la unidad seleccionada para el control de la antena en azimut y elevación, la figura 5.18 muestra este elemento.

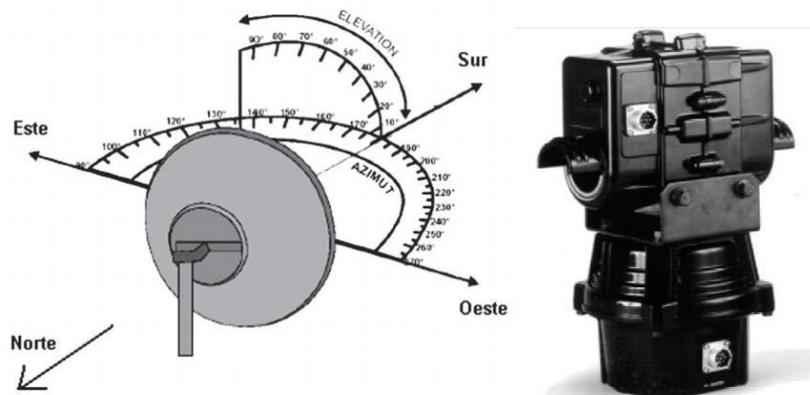


Figura 5-18 Rotor YAESU G-5500 en azimut / elevación

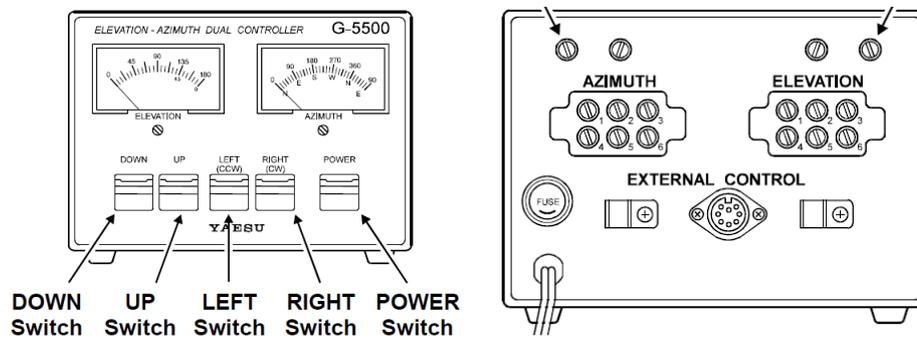


Figura 5-19 Control del rotor en azimut y elevación ²⁴

²⁴ http://www.yaesu.co.uk/files/G-5500%20Operating%20Manual_a.pdf

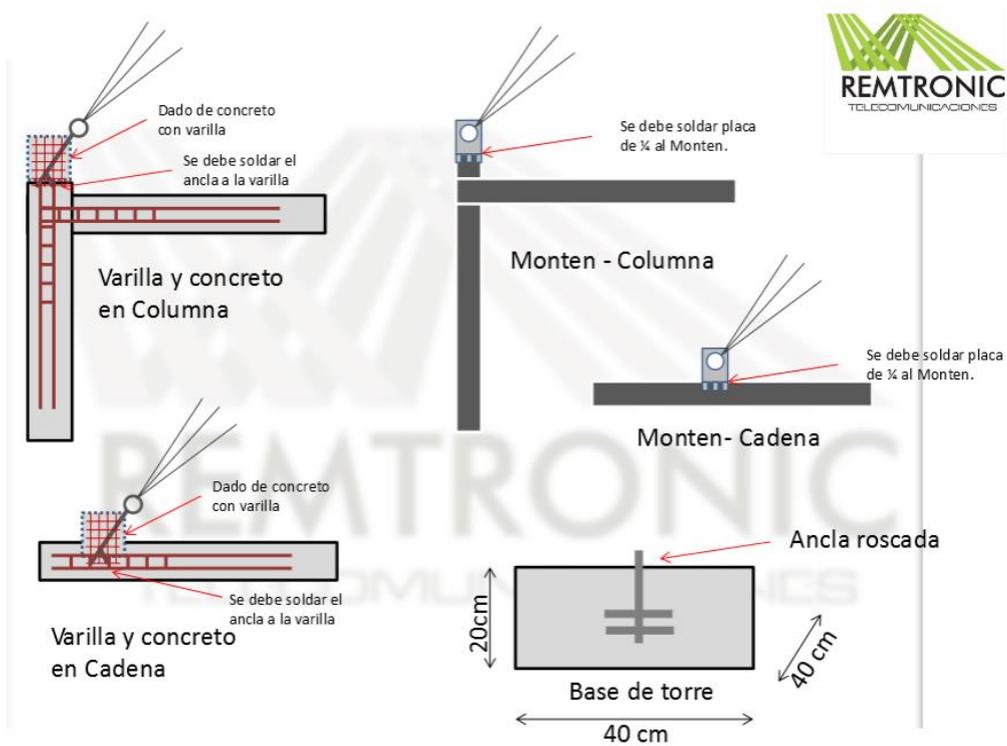
Algunas características son: [74]

- Voltaje requerido: 110-120 o 200-240 VAC
- Tensión del Motor: 24 VAC
- Tiempo de rotación (aproximadamente, 60Hz): Elevación (180°): 67 seg.
- Azimut (360°): 58 seg.
- Máximo operación continua: 5 minutos
- Par de giro: Elevación: 14 kg-m (101 ft-lbs)
- Azimut: 6 kg-m (44 ft-lbs)
- Par de frenado: Elevación: 40 kg-m (289 ft-lbs)
- Azimut: 40 kg-m (289 ft-lbs)
- Carga vertical: 200 kg (440 libras)
- Exactitud: ± 4 porciento
- superficie del viento: 1 m²
- Los cables de control: 2 x 6 conductores - # 20 AWG o superior
- Diámetro del mástil : 38-63 mm (1-1 / 2 a 2-1 / 2 pulgadas)
- Diámetro del Boom: 32-43mm (1-1 / 4 a 1-5 / 8 pulgadas)
- Peso del Rotor: 9 kg (20 libras)
- Peso del controlador: 3 kg (6,6 libras)

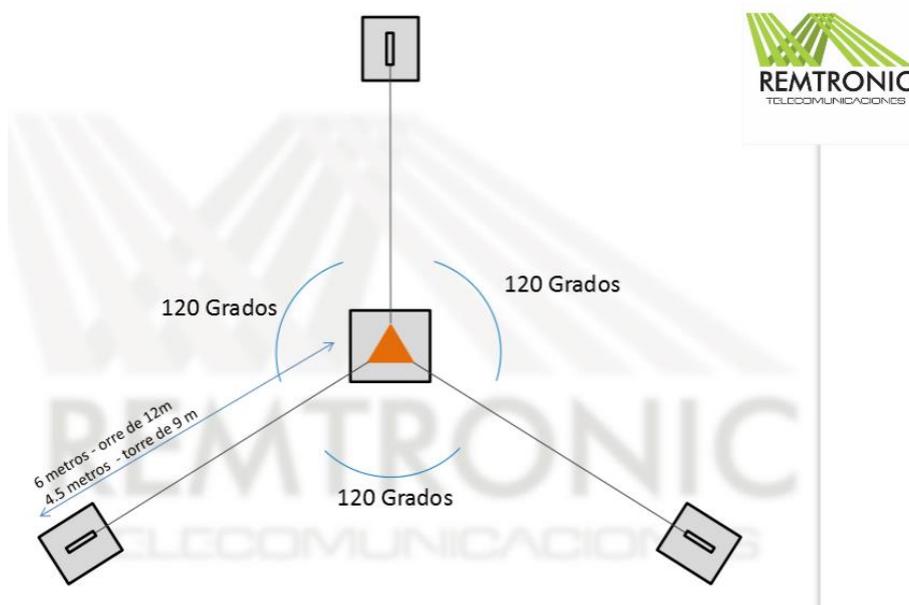
5.3.5 Torre y aparta rayos

La torre que se ha seleccionado para colocar nuestras antenas, se compone de dos tramos de postes afilados de acero galvanizado y huecos de 3 metros cada uno. Los tirantes que se empleen para fijar la torre en donde se colocara el rotor y antenas deberán de estar de acuerdo a la altura de la torre y a la velocidad esperada del viento en la zona en la que se encuentra el Centro de Alta Tecnología (CAT).

En la figura 5.20 se muestran las especificaciones pedidas por el proveedor para la instalación de los tirantes para soporte de la antena, al igual que la separación en grados que deben tener las anclas para una torre de 6 metros.



a)



b)

Figura 5-20 a),b) Especificaciones para la instalación de la antena [Remtronic]

En la siguiente figura 5.21, se muestra un ancla con tirantes de acero para soporte de la antena instalada.



Figura 5-21 Tirantes de acero sujetos a una de las anclas

Finalmente la torre que se instalara en el CAT es una torre Arriostrada de 6 metros con base, sin copete, para colocación de rotor y accesorios de montaje. Sin pintar. Tipo STZ35

5.4 Selección y cotización de equipo

Tabla 5.4 Equipo propuesto

EQUIPO	MODELO	Costo aprox.
Transceptor (Radio VHF/UHF)	TS-2000X	2000 dlls
Rotor en Azimut y Elevación	G-5500	1000 (dlls)
Antena yagi 144-146 MHz	2MXP20	400 (dlls)
Antena yagi 430-440 MHz	436CP30	320 (dlls)
Transceptor (Radio VHF/UHF)	TM-D710G	
Conectores DAIWA DC	CS-201GH	
Gabinete con puerta de cristal	OPGAPI042PC	
Torre	STZ35	300 (dlls)
Barra de tierra	GB2BO304TPI-1	35 (dlls)
Fuente de poder	SEC 1235	
Computadora de escritorio	DELL	
Medidor de ondas estacionarias (SWR)	CN-103L	
Interfaz entre la computadora y control de rotor	GS-232B	
Pre-amplificador		
Software de seguimiento	-----	

5.5 Propuesta técnica final de estación terrena

Algunas de las principales funciones que se realizaran en la estación terrena son:

- Rastreo de satélites (proyectos de la UNAM: CONDOR, QUETZAL Y ULISES 2.0)
- Monitoreo del funcionamiento de los satélites así como de sus subsistemas
- Bajada de telemetría y envío de comandos para control del satélite.

Las estaciones terrenas, tienen un funcionamiento general en el cual se realizan actividades como:

La transmisión, en la cual la señal se modula y se envía al convertidor de subida y después pasa al amplificador de alta potencia para después ser envía hacia el satélite por medio de la antena.

La recepción, en este proceso la señal pasa por un pre-amplificador de bajo ruido (LNA), después al convertidor de bajada y finalmente se demodula para poder utilizar la información.

Para la selección final de la antena, se realizaron algunas consideraciones como el espacio disponible que se tenía para su instalación, que fuera una zona alta para tener

la menor cantidad de obstáculos, la aplicación, la banda de frecuencias en la que operará, ganancias y costos de la estación terrena.

En la figura 5.22 se muestra un esquema de los elementos dentro del cuarto de control designado en el CAT para la estación terrena, en la derecha se muestra el cuarto donde se ubicaran los equipos tales como; una computadora y el rack con algunos equipos como radios, sistema de control de azimut/elevación y el medidor de ondas estacionarias y en la parte izquierda se observa el área del techo del cuarto de control en la cual se instalarán las antenas. El costo estimado es de 100,000 pesos.



Figura 5-22 Elementos de la Estación Terrena Propuesta

5.6 Simulación de los pases de un satélite sobre Querétaro con STK

para la realización de estas simulaciones, se utilizó como caso de estudio el satélite Cóndor para observar cual es la cantidad de pases que se tendrían en un mes sobre la estación terrena en Juriquilla Querétaro así como la cantidad de tiempo en la que sería posible bajar información de telemetría de servicio e información científica desde dicho satélite.

CONDOR UNAM-MAI, es un proyecto satelital en colaboración con el Instituto de Aviación de Moscú MAI en Rusia y el Centro de Alta Tecnología de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. El satélite apoyara la investigación que será utilizado para la investigación de precursores ionosféricos de terremotos y observación remota de la superficie de la tierra.

STK (Systems Tool Kit), es un software que ayuda a simular el comportamiento de algunos sistemas complejos como los aviones, misiles y satélites, las simulaciones realizadas, ayudan a visualizar un conjunto de datos en 4 dimensiones, ejes X, Y, Z y tiempo, esto ayudara a tomar mejores decisiones para el desarrollo de proyectos satelitales. [30]

Durante el desarrollo de esta tesis, se utilizó este software para realizar un análisis de la cantidad de veces que el satélite CONDOR pasaría sobre el territorio mexicano y conocer cuánto tiempo la estación terrena que se propone instalar en Juriquilla Querétaro, tendría contacto con el satélite o cualquier otro que opere en órbita baja.

Para realizar las simulaciones, se consideró un ángulo de inclinación de 98° y con una órbita síncrona solar, para aprovechar lo mejor posible la luz solar. Las simulaciones nos muestran el número de pases sobre Juriquilla Querétaro además del tiempo en el que es posible realizar un enlace entre la estación terrena propuesta y dicho satélite de órbita baja que se propone este a 800 km de altura.

En la figura 5.23 se observan algunos de los parámetros como:

- Tipo de orbita: síncrona solar
- Altura 800 km
- Angulo de inclinación 98°

Datos que el software requiere para realizar la predicción de pases.

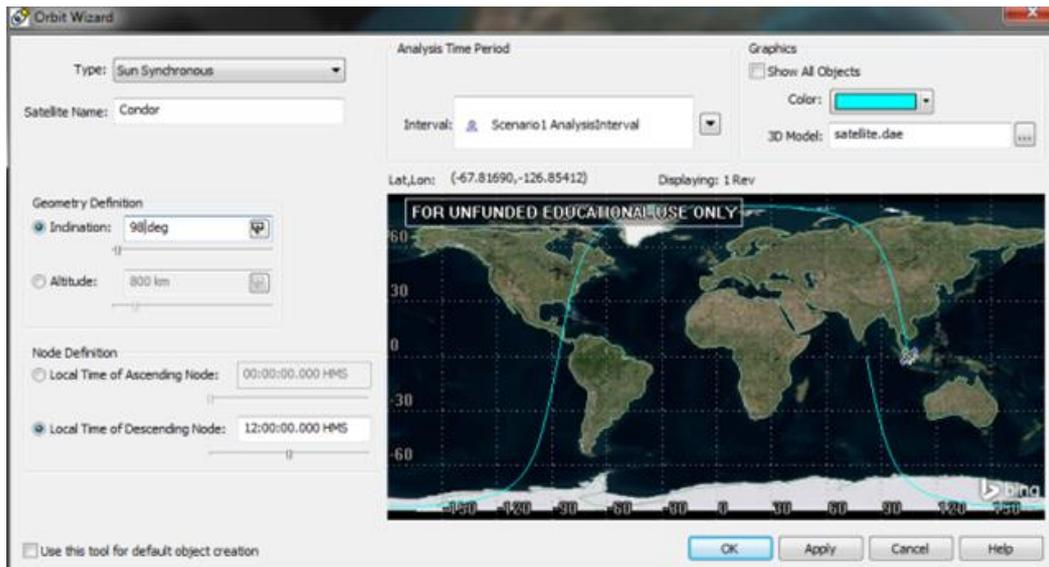


Figura 5-23 Datos requeridos por el software [STK-AGI]

En LA figura 5.24, la línea que atraviesa el planeta, es el recorrido del satélite presentado en 3D, que es una de las opciones de STK para visualizar los pases del mismo

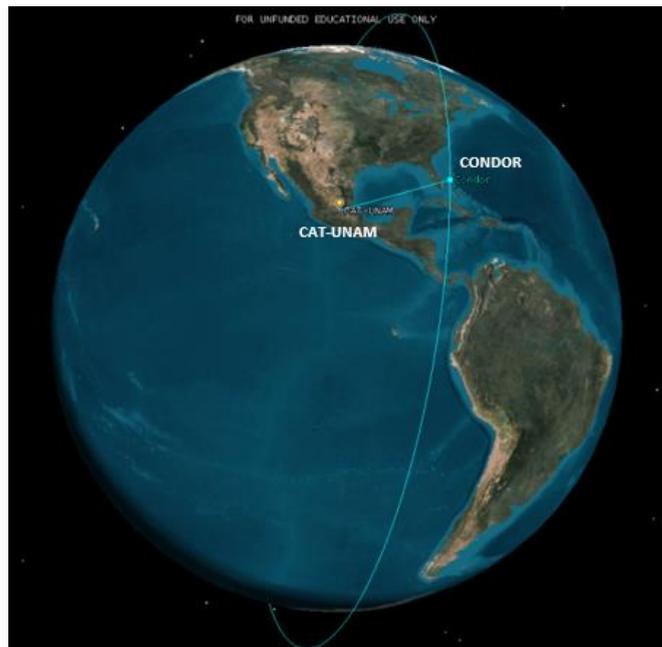


Figura 5-24 Vista de STK en 3D [STK-AGI]

En las figuras 5.25, 5.26 y 5.27, las líneas blancas sobre el territorio nacional, muestran cada uno de los pases que tendrá el satélite sobre el CAT con posibilidad de tener contacto con la estación terrena propuesta en periodos de un día, una semana y un mes, orbitando a una altura de 800 km de altura con orbita síncrona solar y 98° de inclinación.

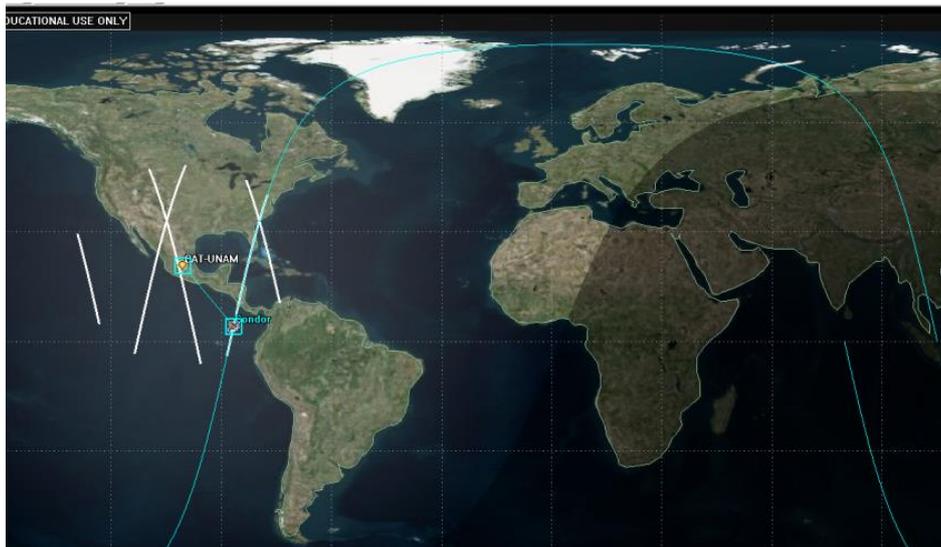


Figura 5-25 Pases sobre el CAT en un día [STK-AGI]

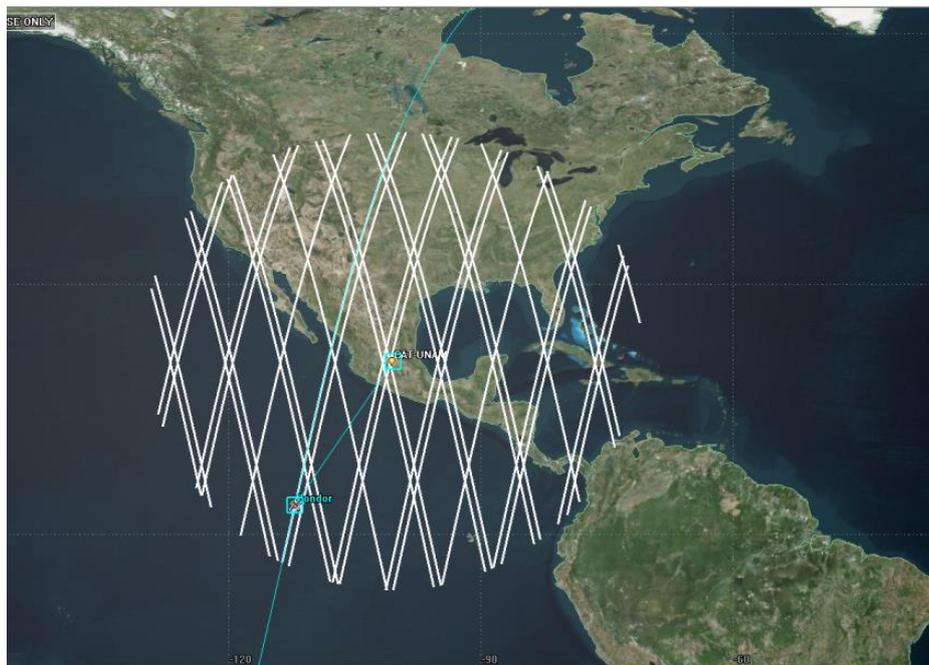


Figura 5-26 Pases sobre en CAT durante una semana [STK-AGI]

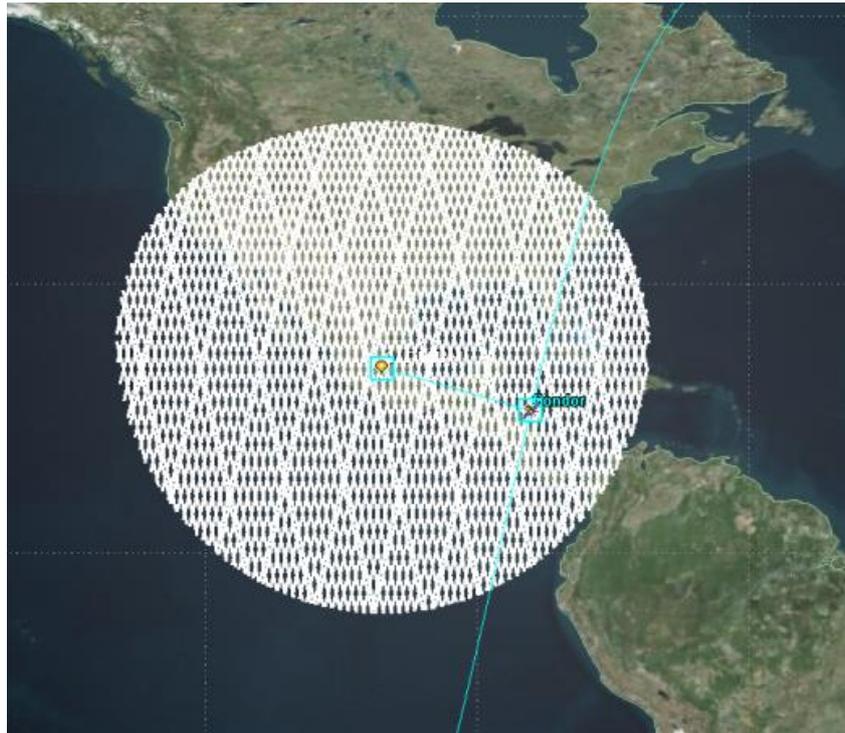


Figura 5-27 Pases sobre el CAT durante un mes [STK-AGI]

En la siguiente tabla 5.5 se muestra el tiempo total de pases sobre el Centro de Alta Tecnología durante un día, una semana y un mes

Tabla 5.5 Duracion de los pases en un día, una semana y un mes [STK-AGI]

Periodo	1 día	1 semana	1 mes
Tiempo [segundos]	3530.99	24077.553	106857.353
Tiempo [minutos]	58.85	421.29	1780.95

Como se menciona anteriormente, STK es una herramienta muy útil para predecir los pases de determinado satélite conociendo algunos datos, para esta simulación se consideró que la órbita del satélite tenía un ángulo de inclinación de 98 grados y con ello, se obtuvo la cantidad de veces que este satélite pasaría sobre territorio mexicano.

La línea curvada color azul, muestra el recorrido alrededor de la tierra mientras que las líneas blancas sobre el mapa de las figuras, representan la cantidad de veces que el satélite pasa por encima de nuestro territorio en un día, una semana o un mes respectivamente.

Finalmente STK, además de mostrar gráficamente la cantidad de pases del satélite, puede también mostrar estos resultados en una tabla de datos en la cual se encuentra la fecha de la simulación, el número de acceso en el día, el momento en el que comienza

a tener cobertura sobre dicha área, en el momento en el que termina, la duración del tiempo disponible para tener acceso y el tiempo total. Esto se observa en la figura 5.28.

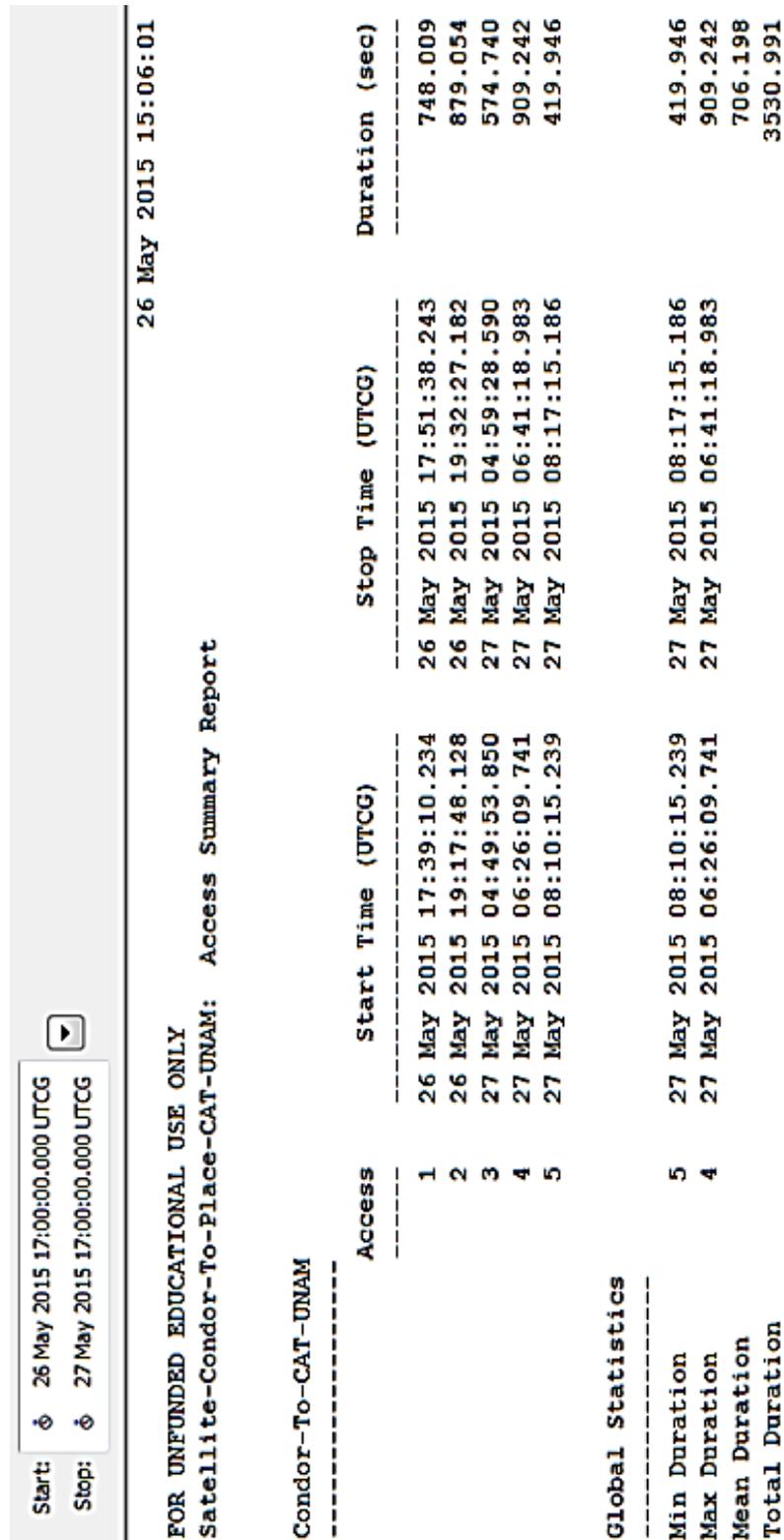


Figura 5-28 Datos obtenidos con STK [STK-AGI]

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del presente trabajo, se observó la gran importancia de conocer la arquitectura básica de una estación terrena satelital. Ante esto, se consideraron en la propuesta subsistemas tales como: antenas, PC, software de seguimiento, pre-amplificadores, radios, antenas, rotores, controles de azimut-elevación, etc., además características técnicas tales como la ganancia y la polarización en el caso de las antenas.

La presente propuesta técnica de estación terrena para operar satélites en orbitas bajas operando en las bandas de frecuencias VHF/UHF se llevó a cabo para complementar el desarrollo de las misiones satelitales (Ulises 2.0, CONDOR UNAM-MAI y QUETZAL UNAM-MIT) las cuales se llevan a cabo en el Laboratorio Nacional (Centro de Alta Tecnología - CAT) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en Juriquilla en el estado de Querétaro.

Con base en nuestras investigaciones realizadas durante el desarrollo del presente trabajo es posible concluir que la estación terrena apoyará de manera directa las misiones satelitales arriba mencionadas las cuales cubrirán aplicaciones como: observación de la tierra, de investigación, de comunicaciones, etc. Ante esto, la propuesta de estación terrena que se presenta satisface el objetivo del presente trabajo ya que se empleará para operar al micro satélite en colaboración internacional CONDOR UNAM-MAI y/o cualquier otro proyecto satelital desarrollado en México fuera de los que se desarrollan en el CAT. El micro satélite recibirá comandos en la banda de frecuencias VHF y enviará su telemetría de servicio a la estación terrena en la banda de frecuencias UHF.

Se tomó como caso de estudio al satélite CONDOR UNAM-MAI, para la realización de cálculos con los cuales se obtuvo como resultado una buena relación señal a ruido teórica, lo que ayuda a comprobar que las características técnicas de los equipos (radios y antenas VHF/UHF) son las adecuadas para el buen funcionamiento de la estación terrena propuesta.

Es importante conocer las herramientas para realizar seguimiento satelital así como los datos (base de datos de NORAD) que el software requiere para realizar dicho rastreo, además de interpretar los datos proporcionados por la herramienta de seguimiento (elementos orbitales en dos formatos, AMSAT y NASA) ya que existen en el mercado una gran cantidad de estas y para una buena selección, es necesario considerar la compatibilidad con los rotores propuestos para la estación terrena.

Al realizar la investigación respecto a las regulaciones nacionales e internacionales en torno al uso de frecuencias para la operación de la estación terrena, se concluye que es necesario obtener un certificado de acuerdo con los lineamientos establecidos por las organizaciones nacionales (IFT y SCT) e internacionales (UIT e IARU) además de solicitar la concesión de frecuencias respectiva ante la Secretaría de Comunicaciones y Transportes según los requisitos establecidos ante las recientes modificaciones a la ley de Telecomunicaciones.

CONCLUSIONES

También hemos de concluir, que es necesario tomar en cuenta las características y requerimientos para la correcta instalación y operación de la estación terrena ya que pueden presentarse problemas de espacio, falta de sistema de tierras, alimentación, línea de vista, etc.

Finalmente con ayuda del software STK-AGI y con los resultados de las simulaciones se concluye que el número de pases al día en línea de vista de la estación terrena propuesta en el CAT en Juriquilla, Qro., es de aproximadamente 6 veces y tienen una duración en línea de vista de casi una hora, considerando todos los pases realizados por el satélite durante un día. Siendo este, tiempo útil para bajar la telemetría de servicio y así conocer el estado operativo del satélite y/o para enviar comandos para modificar algún modo de operación de los subsistemas de servicio o de carga útil.

Esta propuesta, es parte importante para complementar los proyectos satelitales realizados por la UNAM además de ayudar a obtener conocimiento sobre la operación de satélites realizados en nuestro país y contribuir a la independencia tecnológica en el ámbito satelital.

La estación terrena se instará en las instalaciones del CAT en Juriquilla Querétaro lo que contribuirá a la formación de ingenieros en Telecomunicaciones y áreas afines principalmente de las universidades y tecnológicos de la región (UAQ, UNAQ, etc.) en donde no hay este tipo de infraestructura.

TRABAJO A FUTURO

Realizar cálculos más precisos de enlace, considerando valores reales de órbita tales como altura e inclinación así como de potencia y ganancia de cada satélite que se dese rastrear.

Para realizar las predicciones orbitales consultar nuevamente los datos en la base de datos de NORAD ya que es ahí donde se encuentran los elementos orbitales de todos los satélites puestos en órbita ya que estos son conocidos hasta su puesta en órbita pues son definidos por el lanzador.

Integrar la estación terrena a la red internacional de estaciones para participar en proyectos internacionales.

Considerar nuevamente la actualización de la estación terrena ubicada en el edif. Valdés Vallejo de la facultad de Ingeniería de la UNAM en Ciudad Universitaria como una opción de respaldo para recibir la información de los satélites que actualmente desarrolla el CAT.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- [1] The ARRL Satellite Handbook, Steve Ford, WB8IMY, ARRL, USA, 2010
- [2] Revista: INFORMACION CIENTIFICA Y TECNOLOGICA/VOL. 7, NUM.100
- [3] Bruce Elbert. The satellite communication ground segment and earth station handbook. Archet house. London.
- [4] II Congreso internacional de Ingeniería de Telecomunicación
- [5] <http://www.skybridge.com.au/1/home> [10-12-2015]
- [6] capitulo 2 "El rastreo satelital" [AMSAT]
- [7] Satellite communications systems Engineering, Louis J. Ippolito Jr., wiley, USA, 2008.
- [8] Mauricio Ortega Ruiz. Matlab aplicado a telecomunicaciones, Alfaomega, México, 2015
- [9] manual de usuario de nova for Windows
- [10] <http://www.softpedia.com/get/Others/Miscellaneous/Orbitron.shtml>
- [11]<http://www.stoff.pl/>
- [12] <http://www.dogparksoftware.com/MacDoppler.html>
- [13]WWW.IARU.ORG/REGION-2.HTML
- [14] <http://www.iau.org/about.html>
- [15] <http://www.amsat.org/amsat/intro/spanish-intro.html>
- [16] <http://www.xe1rcs.org.mx/info/nuevo.html> /Unam – pinilla <http://www.fmre.mx/>
- [18] comunicación por satélite, principios tecnologías y sistemas, Carlos Rosado, limusa, 1999, México D.F.
- [19] Gerard Maral Michel Bousquet, satellite Communications systems, techniques y technology, wiley, England, 2004
- [20] Neri Vela, Landeros A. Comunicaciones por satélite, primera edición, Universidad veracruzana. 2015. México.
- [21]http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Faraday [20-03-2015]
- [22] Satellite communications engineering, Michael O. Kolawol, editorial Board, USA, 2002
- [23] http://www.rnds.com.ar/articulos/038/rnds_116w.pdf
- [24] tablas
<http://www.condumex.com.mx/ES/telecomunicaciones/Productos%20telecomunicaciones/Cables%20coaxiales.pdf>
- [26] The radio amateur's Satellite Handbook, Martin Davidoff, the American radio Relay league, primera edicion, USA, 1998.
- [27]<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/163/A7.pdf?sequence=7>
- [28]<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/163/A10.pdf?sequence=10>
- [29] Louis j. Ippolito. (2008). Satellite communications systems engineering. USA. Wiley.
- [30] <http://www.norad.mil/Home.aspx><http://es.wikipedia.org/wiki/NORAD> [06-05-2015]
- [31]<http://efemeridesastronomicas.dyndns.org/satelites.htm> [06-05-2015]
- [32]<http://www.astrosurf.com/astronosur/satelites.htm> [06-05-2015]
- [33]<http://spaceflight.nasa.gov/realdata/sightings/SSapplications/Post/JavaSSOP/orbit/ISS/SVPOST.html> [06-05-2015]
- [34] http://es.wikipedia.org/wiki/Tiempo_universal_coordinado
- [34] <http://www.xe.com/es/currency/chf-swiss-franc>

BIBLIOGRAFÍA

- [35]<http://www.itu.int/es/ITU-R/Pages/default.aspx>
- [36]<http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&mlink=itur-welcome&lang=es>
- [37]<http://www.itu.int/es/Pages/default.aspx>
- [38]http://www.cft.gob.mx/es/Cofetel_2008/Cofe_reglamento_de_comunicacion_via_satelite
- [39]<http://www.amsat.org/amsat/intro/spanish-intro.html>
- [40] <http://portalanterior.ift.org.mx/iftweb/informacion-general/>
- [41] James R. Wertz, David F, Everett. (2011). Space Mission Engineering: The new SMAD. USA: Microcosm Press.
- [42]<http://www.agi.com/products/stk/>
- [43]http://www.lu8dze.org.ar/misc-files/2012_Digitales_HF_PSK31.pdf
- [44]http://www.amateur-radio-wiki.net/index.php?title=Modes#Single-Sideband_Modulation_.28SSB.29
- 45 <http://sortingoutscience.net/2008/01/31/explorer-1-at-50/>
- 46 <https://www.youtube.com/watch?v=Q0qrU4nprB0>
- 47 <http://www.mobilemark.com/engineering/antenna-theory-simplified.html>
- 48 <http://www.diarioelectronicohoy.com/antenas-una-explicacion-de-su-funcionamiento-ii/>
- 49 Cervera Gonzalez Vicente, Nuevas Generaciones de Satelites
- 50 Satnews: <http://www.satnews.com/story.php?number=941348567>
- Ciencia, informacion y emergencias: <https://jramosgarcia.wordpress.com/2013/11/10/partes-del-satelite-goce-pueden-caer-sobre-italia-avisa-proteccion-civil/>
- 51 partes-del-satelite-goce-pueden-caer-sobre-italia-avisa-proteccion-civil/
- La razon : http://www.la-razon.com/index.php?url=/sociedad/estacion-Guardia-inaugurada-manana_0_1963603645.html
- 52 estacion-Guardia-inaugurada-manana_0_1963603645.html
- 53 Skinet: [http://es.wikipedia.org/wiki/Skynet_\(sat%C3%A9lites\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Skynet_(sat%C3%A9lites))
- 54 Astronautica y Astrofilatelia: <http://www.miscolecciones.es/Astronautica/Mars/motores.html>
- 55 Smatr Tracker: <http://smatrtracker.com.mx/nosotros/>
- 56 <http://blog.piedemonte.pe/?p=40>
- Tecnoblogueando: <http://tecnoblogueando.blogspot.mx/2014/01/satelites-materiales-y-energia.html>
- 57 materiales-y-energia.html
- 58 Molecular expressions, <http://micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/people/doppler.html>
- 59 Profesor en linea, <http://www.profesorenlinea.cl/fisica/SonidoOndas.htm>
- 60 <http://puemac.matem.unam.mx/puemaco/kepler/html/index.html>
- 61 Leyes de Kepler, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/kepler.html>
- 62 http://ccar.colorado.edu/asen5050/projects/projects_2012/lopez/
- 63 <http://m.forocoches.com/foro/showthread.php?t=2307214>
- 64 : <http://www.thenews.com.pk/article-171739-Russia-delays-decision-on-using-ISS-after-2020>
- 65 El blog de Manuel G. <http://manuel.gf/?p=135>
- 66 <http://html.rincondelvago.com/satelites-y-comunicaciones.html>
- 67 <http://www.globalstar.com.mx/Mapa-Cobertura-Voz-Duplex.html>
- 68 <http://www.satflare.com/iss/?q=iss>
- 69 <https://www.youtube.com/watch?v=G2rIripCcpY>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/6-meter_band#mediaviewer/File:](http://en.wikipedia.org/wiki/6-meter_band#mediaviewer/File:International_Telecommunication_Union_region.svg)
- 70 International_Telecommunication_Union_region.svg
- http://www.tektron.com.co/sitio_prueba/index.php?option=com_content&view=article&id=66:satelitales&catid=41
- 71 article&id=66:satelitales&catid=41
- 72 http://www.m2inc.com/pdf_manuals/436CP30.pdf
- 73 <http://manual.kenwood.com/files/TS-2000-German.pdf>
- 74 http://www.yaesu.co.uk/files/G-5500%20Operating%20Manual_a.pdf

BIBLIOGRAFÍA

75 <http://www.ce2aa.cl/site/equipos-hf/14-temas-tecnicos>

76 Diseño de una estación terrena y propuesta de sistema de telemetría y comando alterno para un satélite de órbita baja, García García J. Luis, México, 2009

77 Design of a prototype communication system for the CubeSTAR Nano-satellite, Tresvig Johan L., Norway, 2010

Anexos

Manual de Transceptor TS-2000X marca KENWOOD

<http://manual.kenwood.com/files/TS-2000-German.pdf>

Manual de control de rotor en azimut y elevación para antenas GS-5500 marca YAESU

http://www.yaesu.co.uk/files/G-5500%20Operating%20Manual_a.pdf

Especificaciones técnicas antena modelo 2MXP20

<http://www.ges.cz/sheets/2/2mXP20.pdf>

Especificaciones técnicas antena modelo 436CP30

http://www.m2inc.com/pdf_manuals/436CP30.pdf

Manual de Transceptor TM-D710GA marca KENWOOD

http://www.gpscentral.ca/manuals/Kenwood_TM-D710GE_GA_Instruction_Manual.pdf

Gabinete profundo 42 UR

<http://optronics.com.mx/index.php?mod=eCommerce&ext=datasheet/8.Gabinete42UR.pdf>

Torre galvanizada modelo STZ-35

<http://www.syscom.com.mx/PDF/mkt/TorresGpdf.pdf>

Medidor de ondas estacionarias (SWR) modelo CN-103L

http://www.naucom.pt/upload/pdf/pdf_1391163905.pdf

Interfaz de PC a controlador de rotores modelo GS-232B marca YAESU

http://www.pestingers.net/PDFs/Other_radios/Rotors/gS-232b.pdf