



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS DE
CONTROL DE ORIENTACIÓN
SATELITAL PARA COMUNICACIONES
EN BANDA S EN SATÉLITES PEQUEÑOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A :

ZEPEDA CASTILLO LUIS ALBERTO



DIRECTOR DE TESIS:

DR. ESAÚ VICENTE VIVAS

México, D.F.

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto de mí vida y ayudarme a no rendirme en los momentos difíciles.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme permitido formar parte de la máxima casa de estudios del país y la mejor universidad de Latinoamérica. A la Facultad de Ingeniería por haberme brindado tan amplio acervo tecnológico y cultural.

A mis padres y familia por haberme apoyado a lo largo de toda mi vida, y por haber inculcado en mí el hábito del estudio y progreso.

A: Aguilar Barrera Sandra, Díaz Sánchez Rubén, Gutiérrez Miranda Consuelo, Hernández Jiménez Julio, Martínez Méndez Margarita, Nuñez Segundo Miguel, Rubio Mejía Elizabeth, Vázquez Landín Georgina, Vázquez Toungate Catalina, y a mis demás compañeros y amigos (pero no menos importantes) de la carrera de Ingeniería en Computación. Así como a: Cortés Riquelme Saúl, González Contreras Guillermo, Mazkiarán Ramírez Miguel, Tzintzun Sánchez Elizabeth, Zamora Peña Liliana, y a mis demás compañeros y amigos (pero no menos importantes) de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones; a todos ellos que hicieron de cada día de estudio un día divertido, emocionante e interesante, por su apoyo y cariño que me impulsaron a seguir adelante, a cada uno le deseo éxito en su vida.

A todos mis compañeros de trabajo en el Instituto de Ingeniería de la UNAM: Emilio Jiménez, Rodrigo Córdoba, Alejandro Córdoba, Eduarno Vizcaíno, Erika Mendoza, Paloma Pedrajas, Mario Mendoza, Mario Hernández, Dierk Lueders, Paúl Domínguez, Génaro Islas e Ignacio Nucamendi que me abrieron las puertas a nuevos proyectos, por sus conocimientos y apoyo les deseo lo mejor.

A mis profesores de la Facultad de Ingeniería que, por amor a la universidad y a la docencia, me inundaron de sus vastos conocimientos y me brindaron las herramientas suficientes para ser un excelente profesional.

A mí tutor el Dr. Esaú Vicente Vivas por haberme dejado participar en sus proyectos, brindarme la oportunidad de conocerlo y haber dirigido mi trabajo.

Resumen

Se presenta una descripción general de un sistema de comunicaciones en satélites pequeños. Se muestran los satélites pequeños que han utilizado comunicaciones en banda S, así como sus sistemas de comunicaciones y los sistemas comerciales que operan de manera exitosa hoy en día.

Se presenta la metodología para el cálculo de enlace del sistema de comunicaciones, así como una descripción detallada del software utilizado para la propagación de microondas.

Se presentan los resultados obtenidos, y (en primera aproximación) su impacto en el subsistema de estabilización del satélite. Para diferentes parámetros de enlace y equipos del sistema se obtienen diferentes impactos en el control de orientación de apuntamiento del satélite.

Se muestra una propuesta para el sistema de comunicaciones en banda S para el satélite HumSAT-México.

Abstract

It presents an overview of a small satellite communications system. It also shows small satellites that have employed S-band communications, their communications system and the commercial systems successfully operating today.

It presents the methodology for calculating communications system link and a detailed description of the software used for microwaves propagation.

It presents the obtained results, and (at first approximation) their impact on satellite stabilization subsystem. For different link parameters and system equipments it is able to get different impacts on the satellite attitude pointing subsystem.

It shows a proposed S-band communications system for HumSAT-Mexico satellite.

Índice General

Índice de Figuras	1
Índice de Tablas	3
1. Introducción a los sistemas de comunicación en satélites pequeños	7
1.1. Introducción	7
1.2. Sistemas de comunicaciones satelitales	8
1.2.1. Segmento espacial	10
1.2.2. Segmento terrestre	11
1.3. Antenas	12
1.3.1. Ganancia	13
1.3.2. Polarización	13
1.3.3. Patrón de radiación	14
1.3.4. Ancho de haz de media potencia (a -3 [dB])	15
1.3.5. Lóbulos secundarios	15
1.4. Antenas para satélites pequeños	16
1.4.1. Microcinta de parche	16
1.4.2. Antena de hélice	16
1.4.3. Dipolo	16
1.4.4. Antena cuadrifilar	17
1.4.5. Monopolo	17
1.5. Estaciones terrenas de satélites pequeños	17
1.5.1. Antenas para estaciones terrenas de satélites pequeños	18
1.5.2. Amplificador de bajo ruido (LNA, Low Noise Amplifier)	22
1.5.3. Amplificadores de alta potencia (HPA, High Power Amplifier)	23
1.5.4. Convertidores de frecuencia	24

1.5.5.	Modulador/Demodulador	25
1.5.6.	Multiplexor/Demultiplexor	26
1.5.7.	Codificador/Decodificador	26
2.	Incidencia de los sistemas de comunicaciones en las aplicaciones de los satélites pequeños	29
2.1.	Introducción	29
2.2.	Clasificación de los satélites	31
2.2.1.	Minisatélites	31
2.2.2.	Microsatélites	32
2.2.3.	Nanosatélites	33
2.2.4.	Pico y Femto Satélites	33
2.3.	Aplicaciones de los satélites pequeños	34
2.3.1.	Satélites de comunicaciones	34
2.3.2.	Satélites científicos	35
2.3.3.	Satélites de observación de la Tierra	36
2.3.4.	Satélites de verificación de tecnología	36
2.3.5.	Satélites militares	37
2.4.	Lanzamiento de satélites pequeños	38
2.4.1.	Lanzador Ariane	38
2.4.2.	Lanzador Athena	38
2.4.3.	Lanzador Delta	38
2.4.4.	Lanzador Cosmos	39
2.4.5.	Lanzador PSLV	39
2.4.6.	Lanzador Rockot	39
3.	Descripción de sistemas de comunicaciones en banda S que se han empleado en satélites pequeños exitosos	41
3.1.	Introducción	41
3.2.	Microsatélite MOST	43
3.3.	Nanosatélite CAN-X2	44
3.4.	Nanosatélite Deli-Next	45
3.5.	Sistema de comunicaciones en banda S del SSTL para satélites pequeños	48
3.6.	Sistema de comunicaciones en banda S de ISIS para satélites pequeños	51

4. Radio Mobile, software para simular la propagación de señales de microondas	53
4.1. Introducción	53
4.2. Parámetros de entrada	55
4.2.1. Parámetros del sistema	55
4.2.2. Parámetros ambientales	56
4.2.3. Parámetros de implementación	57
4.2.4. Parámetros estadísticos	58
4.3. Descripción de Radio Mobile	58
4.3.1. Ficheros	58
4.3.2. Menú Archivo	59
4.3.3. Menú Editar	60
4.3.4. Menú Ver	62
4.3.5. Menú Herramientas	63
4.3.6. Menú Opciones	64
4.3.7. Menú Ventana	64
4.3.8. Menú Ayuda	65
4.4. Barra de herramientas	65
4.5. Configuración de la red	66
4.6. Configuración de unidades	69
4.7. Configuración de mapas	71
4.8. Análisis de resultados con Enlace de radio	72
5. Análisis de requerimientos de apuntamiento para equipos de comunicaciones directivos	75
5.1. Introducción	75
5.2. Apuntamiento de antenas en un satélite estabilizado por giro .	77
5.3. Apuntamiento de antenas en un satélite estabilizado en tres ejes	78
5.4. Planeación del sistema de comunicación satelital	79
5.4.1. Frecuencia de operación	79
5.4.2. Consideraciones de propagación	79
5.4.3. Consideraciones de ruido	86
5.4.4. Problemas de interferencia	89
5.5. Cálculo de los ángulos de elevación y azimut	90
5.6. Cálculo del enlace descendente	91

6. Requerimientos de apuntamiento satelital en órbita baja para equipos de comunicaciones	93
6.1. Introducción	93
6.2. Resumen del enlace descendente	94
6.3. Parámetros adicionales	95
6.4. Gráficas	96
6.5. Resultados	101
7. Propuesta de sistema de comunicaciones en banda S para el satélite HumSAT-México	105
7.1. Introducción	105
7.2. Proyecto HumSAT	106
7.2.1. Iniciadores del proyecto	106
7.2.2. Arquitectura de la red	106
7.3. Propuesta del sistema de comunicaciones en banda S para el satélite HumSAT-México	108
8. Conclusiones y Recomendaciones	111
8.1. Conclusiones	111
8.2. Recomendaciones	114
A. Simulaciones de enlace	115
A.1. Patrón de radiación	115
A.2. Simulaciones	116
B. Ejemplo del cálculo de enlace	121
Referencias	124

Índice de Figuras

1.1.	Segmentos de un sistema de comunicación en satélites pequeños.	10
1.2.	Onda que viaja en el tiempo con LHCP.	14
1.3.	Patrón de radiación de una antena direccional.	15
1.4.	Elementos de una estación terrena.	18
1.5.	Azimut y elevación para una antena.	20
1.6.	Configuración típica de un convertidor ascendente de una sola etapa.	25
3.1.	Arquitectura del microsatélite MOST.	43
3.2.	Nanosatélite CAN-X2.	45
3.3.	Subsistema de comunicaciones del Delfi-Next.	46
3.4.	Antena UHF/VHF (lado izquierdo) y antena de parche para banda S (lado derecho).	47
3.5.	Sistema de comunicaciones en banda S del SSTL para satélites pequeños.	49
3.6.	Sistema de comunicaciones en banda S de ISIS.	51
4.1.	Página oficial de Radio Mobile.	54
4.2.	Ventana de inicio de Radio Mobile.	59
4.3.	Barra de herramientas de Radio Mobile.	65
4.4.	Ventana de Radio Mobile para una nueva red.	66
4.5.	Ventana de configuración de la red.	67
4.6.	Ventana de configuración de estilo.	68
4.7.	Ventana de configuración de unidades.	69
4.8.	Ventana de configuración de mapas en Radio Mobile.	71
4.9.	Red previamente configurada sobre el mapa cargado.	72
4.10.	Ventana de análisis de Enlace de radio.	73

5.1.	Sistema de referencia ideal para un satélite.	75
5.2.	Uso de una antena omnidireccional en un satélite estabilizado por giro.	77
5.3.	Estabilización de un satélite en tres ejes.	78
5.4.	Representación esquemática de una trayectoria Tierra-Espacio dando los parámetros que son entrada al proceso de predicción de atenuación.	81
5.5.	Zonas climáticas de lluvia (15° Oeste - 165° Oeste).	82
5.6.	Atenuación debida a la absorción atmosférica para condiciones climáticas normales (temperatura de 20° y densidad de vapor de agua de 7.5 [g/cm ³]). La Figura (a) muestra una mayor atenuación para ángulos de elevación pequeños, mientras que la Figura (b) muestra que para frecuencias altas se produce demasiada atenuación.	85
5.7.	Contribuyentes de la temperatura de ruido de la antena en la estación terrena.	87
5.8.	Temperatura de ruido del cielo, para condiciones de cielo despejado.	88
5.9.	Componentes para la temperatura de ruido total del sistema.	88
6.1.	BER para un enlace a 380 [Km] con tasa de transmisión constante.	97
6.2.	BER para un enlace a 400 [Km] con tasa de transmisión constante.	97
6.3.	BER para un enlace a 500 [Km] con tasa de transmisión constante.	98
6.4.	BER para un enlace a 600 [Km] con tasa de transmisión constante.	98
6.5.	BER para un enlace a 700 [Km] con tasa de transmisión constante.	99
6.6.	BER para un enlace a 800 [Km] con tasa de transmisión constante.	99
6.7.	Comparación del comportamiento del enlace a una tasa y ángulo de elevación fijos.	100
6.8.	Comparación del enlace a una distancia y ángulo de elevación fijos.	101
7.1.	Arquitectura HumSAT.	107

7.2. Sistema de comunicaciones en banda S.	110
A.1. Patrón de radiación de la antena del satélite (antena de parche).115	
A.2. Patrón de radiación de la antena de la estación terrena (antena de reflector parabólico).	116
A.3. Variable independiente para las gráficas (ángulo off Boresight). 116	
A.4. Red configurada para el enlace de 380 [Km].	117
A.5. Simulación en Enlace de radio para una distancia de 380 [Km]. 117	

Índice de Tablas

1.1. Algunas frecuencias utilizadas en satélites pequeños.	12
2.1. Ventajas y desventajas de los satélites pequeños.	30
2.2. Clasificación de satélites de acuerdo a su masa.	31
4.1. Parámetros de entrada para el modelo ITS/Radio Mobile. . .	55
4.2. Valores sugeridos para Δh	56
4.3. Valores sugeridos para permitividad y conductividad.	56
4.4. Climas y valores sugeridos para N_S	57
5.1. Intensidad de lluvia excedida [mm/h] para ciertos porcentajes de tiempo.	83
5.2. Coeficientes de regresión para estimar la atenuación específica.	84
6.1. Resumen del enlace descendente.	94
6.2. Parámetros adicionales calculados para $\theta = 5^\circ$	95
6.3. Parámetros adicionales calculados para diferentes ángulos de elevación.	95
A.2. Resultados de simulación para diferentes distancias.	119
B.2. Cálculos para el enlace a 380 [Km].	122

Capítulo 1

Introducción a los sistemas de comunicación en satélites pequeños

1.1. Introducción

El objetivo fundamental de un sistema de comunicaciones es transferir información desde un punto de origen denominado “fuente” hasta otro punto al que se quiere llegar denominado “destino”. Por consiguiente, un sistema de comunicaciones eléctrico/electrónico es aquel conjunto de dispositivos eléctricos/electrónicos cuyo único fin es el de transferir información desde la fuente hasta el destino a través de un medio de propagación. La fuente original de información puede ser analógica o digital; sin embargo, todas las formas de información deben de ser convertidas a energía electromagnética (función de un transductor) antes de ser propagadas.

Existen tres partes esenciales de un sistema de comunicaciones eléctrico/electrónico:

- Transmisor (Tx): Su función principal es la de adecuar la señal de entrada a las características del medio de propagación (amplificación, atenuación, filtrado, codificación, modulación, multiplexación, conversión de frecuencias).
- Medio de propagación (Canal de Transmisión): Conjunto de elementos y fenómenos electromagnéticos asociados que permiten el enlace entre

el transmisor y el receptor. Existen dos tipos de medios de propagación: ondas guiadas (líneas de transmisión, fibra óptica) y ondas no guiadas (antenas).

- Receptor (Rx): Sus funciones principales son seleccionar la señal deseada de entre las varias que pueden existir en el medio de propagación y adecuarla al transductor de salida para su correcta interpretación (amplificación, atenuación, filtrado, decodificación, demodulación, demultiplexación).

A continuación se indican fechas y eventos destacados en el campo satelital y afines.

En 1837 Samuel Morse desarrolló el primer sistema de comunicaciones electrónico a base de inducción electromagnética, el cual fue llamado “telégrafo”. En 1876 Alexander Graham Bell y Thomas A. Watson crearon un sistema de comunicaciones basado en un hilo delgado para transferir voz humana, al cual llamaron “teléfono”. En 1894 Guglielmo Marconi transmitió por primera vez señales de radio, sin hilos, a través de la atmósfera terrestre[31]. En 1945 Arthur C. Clarke publica en la revista *Wireless World* un artículo llamado “Extraterrestrial Relays” (Retransmisión extraterrestre), el cual menciona la idea de un satélite que es colocado a una altura de alrededor de 36 000 [Km] de la superficie terrestre, orbitará de forma síncrona la Tierra y será capaz de recibir y transmitir señales desde un punto en la Tierra a otro punto distinto de la superficie de acuerdo a la vista del satélite. En 1957 el Sputnik 1 se convierte en el primer satélite puesto en órbita terrestre por la URSS. En 1962 el Telstar 1 se constituye en el primer satélite de telecomunicaciones puesto en órbita por EU. En 1981 el UoSat 1 (OSCAR 9) es el primer satélite pequeño (microsatélite, 52 [Kg]) puesto en órbita por la Universidad de Surrey, Inglaterra.

En este capítulo se pretende dar una breve descripción de un sistema de comunicaciones satelital enfocado a satélites pequeños.

1.2. Sistemas de comunicaciones satelitales

Un sistema de comunicación satelital consiste en un satélite artificial que orbita la Tierra y que recibe señales de una estación terrena transmisora, las amplifica y procesa para mandarlas de regreso a Tierra para su recepción en una o más estaciones terrenas receptoras. El satélite es un dispositivo

creado por el hombre y que es puesto en órbita para realizar tareas ya sean de comunicaciones o de captura de imágenes de nuestro planeta.

Las comunicaciones por satélite brindan ciertas características que no se encuentran disponibles en otros medios de transmisión. Algunas de sus ventajas son:

- Área de cobertura: De acuerdo a la órbita, un satélite puede tener una cobertura regional, nacional, internacional, continental o global. De ésta manera, se puede brindar servicio a lugares de difícil acceso.

- Alta Capacidad: Los enlaces satelitales involucran portadoras de alta frecuencia, lo que brinda grandes anchos de banda de información en satélites comerciales. Para un satélite pequeño el rango típico de capacidad va desde unos cuantos bauds hasta los 10 [Mbps].

- Costos independientes: El costo de la transmisión satelital es básicamente el mismo, sin importar la distancia del enlace o el número de estaciones terrenas receptoras (radiodifusión).

La implementación exitosa de un sistema de comunicaciones satelital requiere de una robustez en los enlaces por aire (enlace ascendente y enlace descendente) para asegurar que las señales llegarán de forma adecuada a su destino, debido a que la transmisión a través de la atmósfera degrada las características de la señal.

Un sistema de comunicación en satélites pequeños está dividido de manera general en dos áreas o segmentos: segmento espacial y segmento terrestre. Dichos segmentos se muestran en la Figura 1.1.

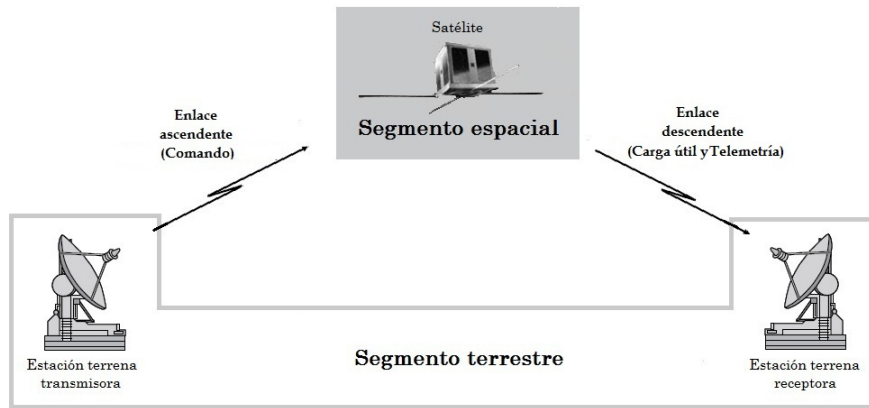


Figura 1.1: Segmentos de un sistema de comunicación en satélites pequeños.

1.2.1. Segmento espacial

Como se puede observar en la figura anterior, éste segmento contiene al satélite (o satélites) en órbita del sistema.

Un satélite realiza dos funciones principales: ejecuta las órdenes que son enviadas en el enlace ascendente, y envía información por el enlace descendente. Un satélite está conformado por diversos subsistemas, en el caso de un satélite pequeño los principales subsistemas son:

- Estructura: Su función principal es mantener a los subsistemas en una posición fija (chasis del satélite).
- Potencia: Su función principal es almacenar, regular y proveer energía eléctrica a todos los subsistemas (baterías, celdas solares).
- Estabilización: Su función principal es mantener el satélite estable y en una posición fija para asegurar las comunicaciones (ruedas inerciales, bobinas de torque magnético).
- Computadora de Vuelo: Su función principal es coordinar las diversas acciones entre los subsistemas (microprocesadores, memorias satelitales).
- Telemetría y Comando: Su función principal es conocer el estado del satélite y comandarlo (sensores, comunicaciones RF).

- Comunicaciones: Su función principal es asegurar la correcta recepción/transmisión de la información desde/para Tierra (antenas, transmisor, receptor).
- Carga útil (Payload): Define la misión o aplicación del satélite (transpondedor en satélites de comunicaciones).

1.2.2. Segmento terrestre

El segmento terrestre consiste de las estaciones terrenas terminales, las cuales conectan los equipos del usuario por medio de redes terrestres. La estación terrena transmisora recibe la telemetría y envía el comando al satélite, y en ocasiones también funciona como estación terrena receptora para la carga útil. Existen tres tipos de estaciones terrenas terminales[20]:

- Fijas: Éstas estaciones están diseñadas para mantenerse fijas en un lugar, es decir, que no exista movimiento mientras se realiza la comunicación vía satélite. Un ejemplo de estas terminales son pequeñas terminales utilizadas en redes privadas (VSAT's fijas, Very Small Aperture Terminal).
- Transportables: Son diseñadas para ser movibles, pero una vez ubicada en un lugar se deben de mantener fijas para realizar la comunicación vía satélite. Un ejemplo de estas terminales son las utilizadas en camiones (SNG, Satellite News Gathering).
- Móviles: Son diseñadas para comunicarse con el satélite mientras están en movimiento. Son definidas de acuerdo a su localización en la superficie terrestre, tal como móvil terrestre, móvil aeronáutico o móvil marítimo. Un ejemplo de estas terminales son VSAT's móviles.

Como se mencionó anteriormente, las misiones de pequeños satélites lanzadas hasta hoy, dependen de su autonomía a bordo; por lo que no se necesita que la estación terrena lo esté monitoreando continuamente, lo que simplifica y reduce el costo del segmento terrestre.

Para satélites pequeños, los enlaces ascendentes y descendentes sufren de una menor atenuación en comparación a grandes satélites (debido a una menor distancia de recorrido). Además, debido a su autonomía a bordo, los enlaces ascendentes solo son para cuestión de comando (menor capacidad de información) y los enlaces descendentes son para la transmisión de datos

y carga útil (mayor capacidad de información). Por tal motivo, en satélites pequeños, el enlace ascendente suele operar en frecuencias de VHF y UHF, mientras que el enlace descendente suele operar en bandas VHF, UHF, en muy pocos casos en banda L, y la actual tendencia es la banda S. Algunas de las frecuencias asignadas a las comunicaciones vía satélite, en satélites pequeños, se muestran en la Tabla 1.1[2].

Banda	Rango de frecuencias [GHz]	Frecuencia utilizada [GHz]	Enlace
VHF	0.03 - 0.3	0.1458250	Ascendente
		0.1459250	Ascendente
		0.1458700	Descendente
		0.1459300	Descendente
UHF	0.3 - 3	0.4321250	Ascendente
		0.4357650	Descendente
		0.435900	Descendente
		0.436000	Descendente
L	1 - 2	0.4375050	Descendente
		1.2666870	Ascendente
		1.2676000	Ascendente
S	2 - 4	1.2687000	Ascendente
		2.2500000	Descendente
		2.3041000	Descendente
		2.4012000	Descendente

Tabla 1.1: Algunas frecuencias utilizadas en satélites pequeños.

1.3. Antenas

Las antenas en satélites pequeños son utilizadas para recibir y transmitir señales de RF que conforman los enlaces del canal de comunicación. Las antenas son una parte importante del sistema de comunicación satelital debido a que es el elemento esencial en el incremento de la potencia de las señales recibidas o transmitidas para permitir la comunicación. A continuación se describen los parámetros más importantes para conocer el comportamiento de una antena.

1.3.1. Ganancia

La ganancia, $G(\theta, \phi)$, en una dirección específica, (θ, ϕ) (coordenadas esféricas), se define como la razón de la intensidad de radiación¹, $U(\theta, \phi)$, en una dirección dada, a la intensidad de radiación que sería obtenida si la potencia aceptada por la antena fuera radiada isotrópicamente², P_T .

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_T}$$

El valor donde $G(\theta, \phi)$ tiene máxima radiación es simplemente llamado ganancia de la antena y suele expresarse en [dBi] (decibeles referidos a una antena isotrópica). Este valor de G , está relacionado con la apertura física de la antena, A_f , con la longitud de onda, λ , y con la eficiencia de la antena, η , por la expresión:

$$G_{max} = 10 \log \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \eta A_f \right) \text{ [dBi]}$$

En el caso de una antena de apertura circular de diámetro, D , la ganancia se calcula como:

$$G_{max} = 10 \log \left[\eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right] \text{ [dBi]}$$

Comúnmente en comunicaciones satelitales, suele utilizarse el término de PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Efectiva) y se define como el producto de la potencia de transmisión y la ganancia de la antena. Si la ganancia ya se conoce en [dBi], entonces la PIRE es:

$$PIRE \text{ [dBW]} = 10 \log(P_T \text{ [W]}) + G \text{ [dBi]}$$

1.3.2. Polarización

Se refiere a la polarización de la onda radiada por la antena, que se define como la dirección y magnitud relativa, variante en el tiempo, del vector de campo eléctrico; específicamente la figura trazada por el extremo del vector.

Existen tres tipos de polarizaciones:

¹Potencia radiada por unidad de ángulo sólido (ángulo en el espacio por el cual se radia toda la energía).

²Una antena isotrópica es una antena hipotética que radia uniformemente en cualquier dirección.

- Lineal: El vector de campo eléctrico se mantiene orientado en un solo plano a lo largo de la dirección de propagación.
- Circular: El vector de campo eléctrico cambia su dirección a lo largo de la dirección de propagación. Puede cambiar hacia el lado derecho RHCP (Right Hand Circular Polarization) o hacia el lado izquierdo LHCP (Left Hand Circular Polarization).
- Elíptica: El vector de campo eléctrico cambia su dirección y su magnitud a lo largo de la dirección de propagación.

Es importante mencionar que una antena solo puede transmitir y recibir en la misma polarización, y que la antena receptora debe de tener la misma polarización de la onda transmitida para recibir toda la potencia. La Figura 1.2 muestra una onda con LHCP.

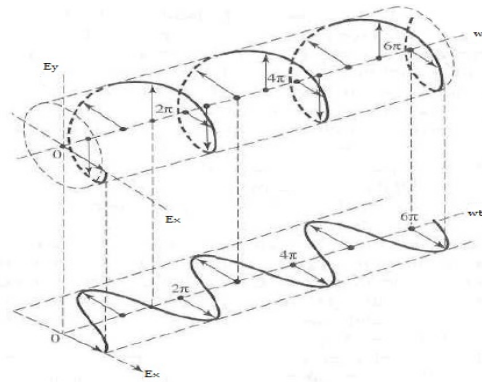


Figura 1.2: Onda que viaja en el tiempo con LHCP.

1.3.3. Patrón de radiación

Es la representación gráfica o mediante una función matemática de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas del espacio. De acuerdo a su patrón de radiación una antena se puede clasificar como:

- Direccional: Tiene la propiedad de transmitir o recibir ondas electromagnéticas de manera más eficiente en algunas direcciones que otras.
- Omnidireccional: Tiene la propiedad de transmitir o recibir ondas electromagnéticas por igual en todas direcciones.

En la Figura 1.2 se muestra el patrón de radiación de una antena direccional.

1.3.4. Ancho de haz de media potencia (a -3 [dB])

En un plano que contiene la dirección de máxima radiación, es el ángulo que se forma entre dos direcciones donde la intensidad de radiación es la mitad del máximo valor. En la Figura 1.2 se muestra dicho ancho de haz, θ_{-3dB} , y que en caso de un reflector parabólico se puede calcular como:

$$\theta_{-3dB} = 70 \frac{\lambda}{D}$$

donde:

λ es la longitud de onda de la señal

D es el diámetro de la antena

1.3.5. Lóbulos secundarios

Son lóbulos que se radian en cualquier otra dirección diferente a la dirección principal. Usualmente los lóbulos secundarios se encuentran de forma adyacente al lóbulo principal y su intensidad puede interferir con otros sistemas. En la Figura 1.3 se muestran dichos lóbulos[3].

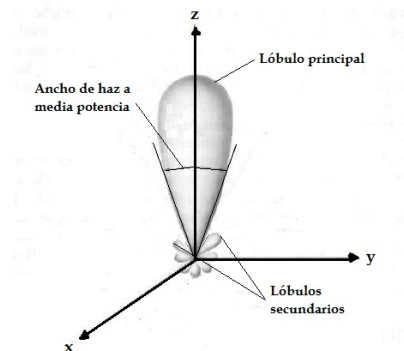
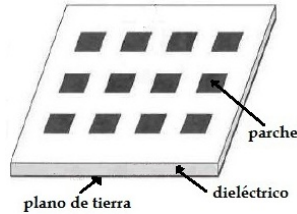


Figura 1.3: Patrón de radiación de una antena direccional.

1.4. Antenas para satélites pequeños

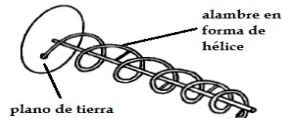
Las antenas para satélites pequeños son generalmente de ganancia modesta, debido a sus limitaciones en tamaño y peso. Son usualmente de polarización circular para facilitar la estabilización, ya que muchos de los satélites pequeños son estabilizados mediante giro. A continuación se mencionan algunas de las antenas más utilizadas[4][13].

1.4.1. Microcinta de parche



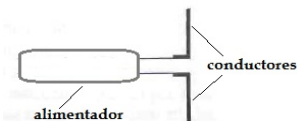
Es una antena de circuito impreso que consiste de parches montados en una capa de dieléctrico sobre un plano de tierra. Sus dimensiones son de cerca de 4 [mm] de espesor y $\frac{\lambda}{2}$ por lado. Utiliza polarización lineal o circular con ganancia entre 5 - 10 [dBi] y un ancho de banda de poco por ciento de la frecuencia central. Para comunicaciones en banda S es la más utilizada.

1.4.2. Antena de hélice



Es un alambre enrollado en forma de hélice sobre un plano de tierra. Sus dimensiones son de cerca de 2λ de largo y $\frac{\lambda}{3}$ de diámetro. Utiliza polarización circular o elíptica con una ganancia de 5 - 20 [dBi] y ancho de banda del 20 % de la frecuencia central.

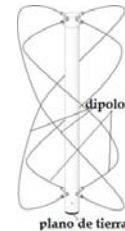
1.4.3. Dipolo



Es una antena consistente de dos conductores que son alimentados en el centro. Sus dimensiones son de alrededor de $\frac{\lambda}{2}$ de largo. Utiliza polarización lineal o circular con 2 [dB] de ganancia y un ancho de banda del 5 % de la frecuencia central.

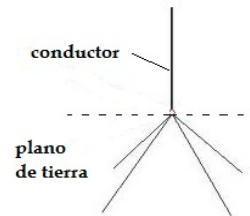
1.4.4. Antena cuadrifilar

Es una antena omnidireccional que en apariencia es similar a una antena de hélice, consiste de dos dipolos cruzados con plano de tierra. Normalmente tiene una relación diámetro/altura de 0.44. Utiliza polarización circular con 5 [dBi] de ganancia y un ancho de banda del 20 % de la frecuencia central.



1.4.5. Monopolo

Es una antena que consiste de un solo conductor sobre un plano de tierra (en este caso, suele ser una serie de conductores que se unen en la base del monopolo). Sus dimensiones son de alrededor de $\frac{\lambda}{4}$ de largo. Utiliza polarización lineal con 2 [dB] de ganancia y un ancho de banda del 5 % de la frecuencia central.



1.5. Estaciones terrenas de satélites pequeños

La complejidad de una estación terrena depende del tipo de misión del satélite. Se puede decir que hay algunas recomendaciones para el diseño de estaciones terrenas de satélites pequeños, entre las cuales destacan:

- La confiabilidad del sistema debe ser suficiente para asegurar que cuando el satélite sea visible para la estación, no se pierda la transmisión de información.
- El sistema debe ofrecer una rápida respuesta a la información y comandos importantes.

GENSO (Global Educational Network for Satellite Operations) es un proyecto lanzado y coordinado por la Oficina de Educación de la ESA (European Space Agency). El objetivo principal es incrementar la confiabilidad de misiones espaciales educativas mediante la formación de una red mundial de

estaciones terrenas que puedan interactuar con diferentes naves espaciales por medio de un software común.

La Figura 1.4 muestra en un diagrama de bloques las partes que contiene una estación terrena.

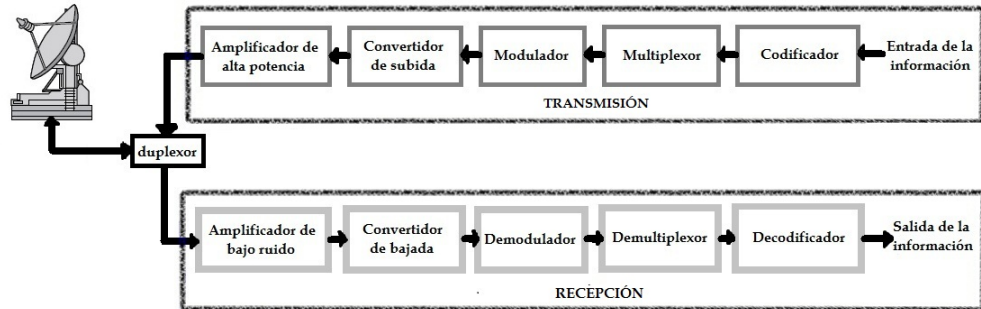
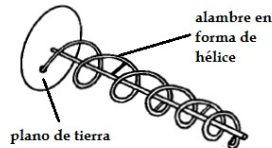


Figura 1.4: Elementos de una estación terrena.

1.5.1. Antenas para estaciones terrenas de satélites pequeños

Las antenas utilizadas en las estaciones terrenas para satélites pequeños usualmente son directivas (ancho de haz estrecho) y con alta ganancia (para compensar la poca ganancia de las antenas del satélite), por esta razón las antenas siguen al satélite cuando está en un rango visible para la estación. Para evitar un desajuste de polarización, dichas antenas usualmente también manejan una polarización circular. Dadas éstas características, las antenas más usadas son:

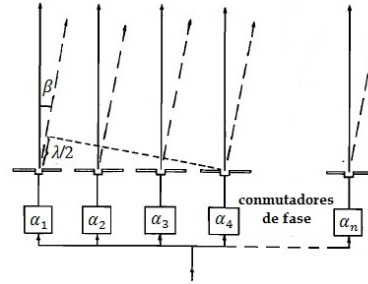
1.5.1.1. Antena de hélice de alta ganancia



Es esencialmente idéntica a la utilizada en los satélites pequeños. Algunas veces se utilizan arreglos de elementos helicoidales para obtener una ganancia mayor en comparación a la que se obtiene al utilizar un solo elemento.

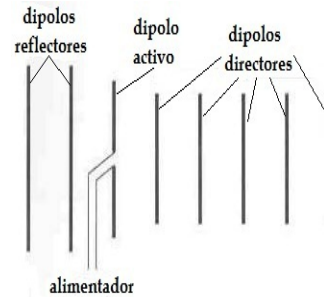
1.5.1.2. Arreglo de antenas en fase

La apertura es excitada por varios elementos radiantes que por sí solos presentan radiaciones débiles. Si todas las fases α_n son iguales, entonces se tiene una interferencia constructiva³ y se produce un haz muy estrecho. Por otro lado, existe un ángulo β para el cual se tiene una interferencia destructiva⁴ por lo que no se tendrá emisión. La principal ventaja es que se puede dirigir el haz solamente cambiando las fases α_n sin mover las antenas; sin embargo su desventaja es la complejidad del arreglo.



1.5.1.3. Antena Yagi-Uda

Es una antena direccional que consiste de un arreglo de dipolos: dipolo activo (conectado al alimentador), dipolos reflectores (se encuentran en la parte anterior del dipolo activo y tienen una mayor longitud para asegurar la disminución del campo electromagnético en su dirección) y dipolos directores (se encuentran en la parte posterior del dipolo activo y tienen una menor longitud para reforzar el campo electromagnético en su dirección y hacer más pequeño el haz de radiación).



1.5.1.4. Antenas de reflector

Son antenas direccionales y las más usuales, formadas principalmente de un plato parabólico. Existen diferentes tipos, de acuerdo al tipo de reflector y al mecanismo de alimentación. El reflector es usualmente un paraboloide, mientras que el mecanismo de alimentación incluye la alimentación de la antena (usualmente un dipolo o una corneta) y es localizada fuera o en el

³Superposición de ondas que se interfieren entre sí creando un nuevo patrón de mayor intensidad.

⁴Superposición de ondas que se interfieren entre sí creando un nuevo patrón de menor intensidad.

foco del paraboloide. El diámetro de la antena, D , requerido para cualquier misión se puede calcular como[12]:

$$D = \frac{6 \times 10^3 S}{F} \sqrt{\frac{R}{P}}$$

donde:

S es el rango satelital⁵ [km]

F es la frecuencia de la portadora [Hz]

R es la tasa de transmisión [bits/s]

P es la potencia de transmisión del satélite [W]

La ubicación y orientación de las antenas en la estación terrena hacia al satélite se realiza mediante dos parámetros importantes: *azimut* y *elevación*. El azimut es la dirección del satélite medido desde el norte geográfico en dirección a las manecillas del reloj, la elevación es el ángulo que se forma entre el satélite y el plano horizontal del observador. La Figura 1.5 muestra los ángulos.

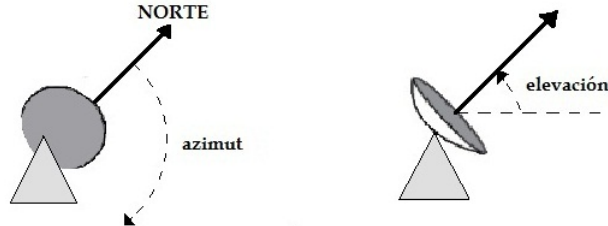


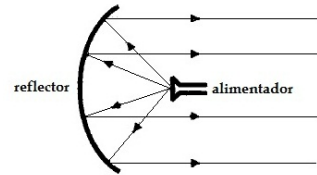
Figura 1.5: Azimut y elevación para una antena.

Algunas de las antenas de reflector más utilizadas son[22]:

⁵Distancia que hay de la estación terrena al satélite.

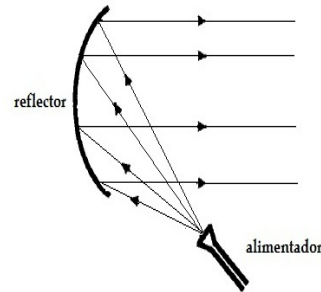
Reflector parabólico con alimentador en el punto focal

Las ondas que viajan del alimentador sufren de una reflexión desde diferentes puntos de la superficie del reflector obteniendo un haz en fase muy concentrado, debido a la longitud de las rutas que recorre cada onda. Sin embargo, la colocación del alimentador significa un obstáculo para la propagación de las ondas.



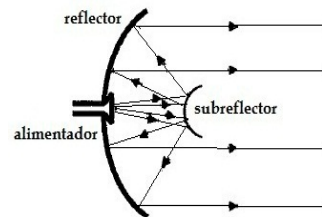
Reflector parabólico seccionado con alimentador desplazado (Offset)

Básicamente opera igual que la antena con alimentador en el punto focal. Sin embargo ésta antena ofrece la ventaja de poder manipular mecánicamente más fácil el alimentador, además de no presentar ningún obstáculo para el viaje de las ondas. Al igual que el caso anterior, se tiene el problema de desborde de señales por las orillas de la superficie, lo que representa pérdidas.



Reflector parabólico Cassegrain

Su configuración geométrica contiene un subreflector con superficie hiperbólica y el alimentador es orientado hacia arriba, por lo que el ruido que se introduce en las señales ya no es por reflexiones en la Tierra sino principalmente por la atmósfera. Esto hace que sea mucho más eficiente que las anteriores y su ganancia es mayor, pero su precio también lo es. Es la antena más utilizada para grandes cantidades de datos.



1.5.2. Amplificador de bajo ruido (LNA, Low Noise Amplifier)

La antena recibe las señales provenientes del satélite y a través del duplexor se las entrega a un amplificador de bajo ruido; dichas señales tienen una intensidad muy baja y son muy vulnerables ante cualquier ruido que se le pueda añadir antes de ser amplificadas a un nivel aceptable (debido a que las señales tienen que recorrer una gran distancia). La principal función de un LNA es amplificar las señales recibidas, agregando la menor cantidad de ruido posible, para que de esta forma en las etapas siguientes no se amplifique el ruido extra añadido y tener una incorrecta interpretación de los datos. Para que un LNA lleve a cabo esa función, hay que tomar en cuenta la propiedad de no linealidad de un amplificador (existe un punto, llamado punto de saturación, en el cual el amplificador en vez de amplificar la señal de entrada, comienza a disminuirla).

Para tener un buen LNA se debe de evitar el ruido de intermodulación⁶, y para ello se debe de aplicar un back-off a la entrada y un back-off a la salida, lo que significa una reducción en la potencia de entrada y salida; de esta manera se estará en el límite de la zona lineal del amplificador (punto de operación) y no habrá ruido de intermodulación[33].

El parámetro principal de un LNA, y que suele brindar el fabricante, es la temperatura de ruido equivalente (T_e) o figura de ruido (F). La temperatura de ruido equivalente es aquella temperatura que genera la misma potencia de ruido a la salida de un amplificador ideal que la generada por un amplificador real cuando éste no tiene ruido a la entrada. La figura de ruido se define como el cociente entre la relación señal a ruido deseada en la entrada del dispositivo y la relación señal a ruido en la salida del dispositivo. A una temperatura ambiente, $T_0 = 290$ [K], ambos parámetros se relacionan de la siguiente manera:

$$NF = 10 \log \left(1 + \frac{T_e}{T_0} \right) [dB]$$

El ruido térmico es aquel ruido producido internamente por cualquier dispositivo. La potencia N [W] del ruido producido por una fuente de ruido térmico puede ser calculada como:

⁶Cuando se trabaja con más de una portadora modulada en su interior, se producen internamente muchas señales adicionales e indeseables que a la salida se suman a la información adicional provocando distorsión.

$$N = kT_e B$$

donde:

k= constante de Boltzmann 1.38×10^{-23} [J/K]

B=ancho de banda de recepción [Hz]

Su característica más importante, es que tiene una distribución plana en el espectro de frecuencias; es decir, la potencia por cada Hertz es constante. Esta propiedad hace que se le conozca también como “ruido blanco” y permite definir una cantidad muy útil, que facilita los cálculos de los enlaces satelitales, conocida como densidad de ruido N_0 [J o W/Hz]

$$N_0 = \frac{N}{B} = kT_e$$

Los principales tipos de LNA son:

- Parámetrotrico (Diodo Varactor): Temperatura de ruido de alrededor de 30 K (en banda S)
- GaAs FET: Temperatura de ruido de alrededor de 30 K (en banda S)
- HEMT: Temperatura de ruido de alrededor de 20 K (en banda S)

Para las demás frecuencias (banda C, Ku y Ka) los amplificadores varían su temperatura de ruido entre un rango de 100 [K] a 500 [K].

1.5.3. Amplificadores de alta potencia (HPA, High Power Amplifier)

Tanto como en la estación terrena y como en un satélite, las señales sufren de varios procedimientos en la etapa transmisora (codificación, multiplexión, modulación, conversión de frecuencia), por lo que su nivel de potencia es bajo para transmitir las; entonces es preciso amplificarlas antes de entregárselas a la antena, para eso se utiliza un amplificador de alta potencia. La principal función de un HPA es amplificar las señales recibidas, agregando la mayor cantidad de potencia como sea posible para que dichas señales puedan viajar grandes distancias y no sufran de una gran atenuación. Para que un HPA lleve a cabo esa función, y al igual que un LNA, hay que tomar en cuenta la propiedad de no linealidad de un amplificador. Debido a que un HPA tiene

como función principal dar la mayor cantidad de potencia sin tomar mucho en cuenta el ruido, y a diferencia de un LNA, un HPA trabaja en el punto de saturación.

El parámetro principal de un HPA es la potencia (ganancia) que pueda brindar a la señal. Básicamente, existen cuatro tipos de HPA[16, 33]:

- Amplificador de Potencia de Estado Sólido (SSPA, Solid State Power Amplifier): Maneja potencias bajas, entre 5 y 50 [W] en banda S y C, y entre 1 y 6 [W] en banda Ku.
- Klystron: Maneja potencias de salida de entre 500 y 5 000 [W] en banda C con una ganancia de 15 [dB], una banda estrecha de 50 [MHz] y una eficiencia del 25%.
- Tubo de Ondas Progresivas (TWT, Traveling Wave Tube): Maneja potencias de salida de entre 100 y 2 500 [W] en banda C con una ganancia de alrededor de 40 [dB], una banda amplia de 500 [MHz] y una eficiencia del 30%.
- Magnetrón: Maneja potencias en banda X de hasta 40 [MW] en alterna y 1 [MW] en continua con una eficiencia del 85%.

1.5.4. Convertidores de frecuencia

El convertidor de bajada convierte las señales a una frecuencia más baja (FI, frecuencia intermedia) para poderlas amplificar. Dicho proceso permite la creación de varios canales de banda estrecha para facilitar muchos tipos de comunicaciones. Éste convertidor incluye un filtro en la entrada y en la salida; el primero es un filtro pasabanda para dar una mejor forma a la señal de RF y eliminar la frecuencia imagen⁷, el segundo se emplea para rechazar las muchas frecuencias indeseadas que son producidas en el proceso de conversión de bajada[11].

El convertidor de subida realiza la función contraria al convertidor de bajada mediante el traslado de las señales amplificadas de FI a frecuencias más altas donde serán transmitidas. Al igual que el convertidor de bajada, durante el proceso se generan muchas frecuencias indeseadas en la salida por lo que es necesario colocar una etapa de filtración antes de enviar las señales a

⁷Frecuencia de entrada no deseada que es capaz de producir la misma FI que la que produce la señal de entrada deseada.

la etapa de amplificación final. La Figura 1.6 muestra la configuración de un convertidor ascendente de una sola etapa (doble conversión o con dos etapas se utiliza para mayores volúmenes de información).

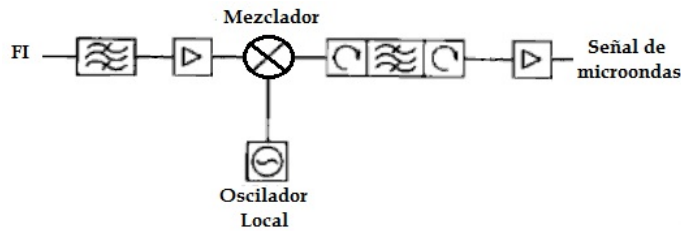


Figura 1.6: Configuración típica de un convertidor ascendente de una sola etapa.

1.5.5. Modulador/Demodulador

La función de un modulador en una estación terrena es sobreponer la información analógica o digital en la portadora FI. El demodulador extrae la información analógica o digital de la portadora FI.

En transmisiones digitales por satélite, la modulación más utilizada es la modulación en fase, específicamente BPSK(Binary Phase-Shift Keying) y QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying). El tipo de modulación define la medida de calidad para enlaces digitales, es decir, la probabilidad de bit en error o BER(Bit Error Rate) que se define como la comparación entre el número de bits en error recibidos y el número de bits transmitidos en un intervalo de tiempo. Éste valor depende de la energía de bit, E_b [J], y de la densidad de ruido, N_0 [J o W/Hz], cuyo cociente se relaciona con la relación señal a ruido (medida de calidad para enlaces analógicos). De esta manera, por ejemplo el BER para una modulación QPSK o BPSK (ambos poseen el mismo) se calcula como[28]:

$$BER = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) = \text{Función complementaria de error}^8.$$

$$\frac{E_b}{N_0} [dB] = \frac{C}{N_0} [dB] - 10 \log(R)$$

$$\frac{C}{N_0} = \text{Relación portadora a densidad de ruido}$$

1.5.6. Multiplexor/Demultiplexor

Un multiplexor combina diferentes canales de información para tener un solo canal en la etapa de modulación, mientras que el demultiplexor realiza el proceso inverso. La multiplexación facilita el proceso de la comunicación ya que permite tener un solo enlace compuesto ascendente o descendente que es transmitido o recibido, respectivamente, en una antena común. Existen diferentes técnicas de multiplexación, entre las que destacan: división de frecuencia y división de tiempo.

La capacidad del (los) multiplexor (es) depende de la cantidad de información a transferir (ancho de banda).

1.5.7. Codificador/Decodificador

La codificación es una técnica de procesamiento de la señal para mejorar la comunicación mediante la introducción de redundancia en la representación de la información, de tal forma que se puedan soportar problemas del canal de transmisión como el ruido y la interferencia.

Un codificador toma una trama de información de k símbolos en la entrada y calcula la correspondiente trama de salida, conteniendo un gran número de símbolos n . La relación entrada a salida de símbolos, k/n , se conoce como tasa de código (r). Algunos de los códigos más utilizados en comunicaciones satelitales son [28, 11]:

- Códigos convolucionales: Incorporan memoria de las tramas de información previas y las utiliza, junto con la información actual, para determinar la trama de salida. Su tasa de código es $r=1/2$ e implementa el algoritmo de Viterbi. Este método modela el codificador como una

⁸Posee valores que son descritos en tablas.

máquina de estados finitos, los estados son los contenedores de memoria. La secuencia entrante es comparada, trama por trama, con cada posible secuencia de código. La codificación convolucional ofrece una elevada ganancia en la corrección de errores.

- Turbo-códigos: Se basan en la concatenación paralela de dos codificadores, iguales o diferentes, separados por un dispersor (técnica consistente en organizar la información digital de forma no contigua para mejorar el sistema). El dispersor es pseudo-aleatorio, mueve los bits de una posición a otra posición de acuerdo a una regla que es generada aleatoriamente. La tasa general de un turbo código formado por la concatenación en paralelo de dos tasas de $1/2$ es $r = 1/3$. Los turbo-códigos mejoran aún más la probabilidad de bit en error.
- FEC (Forward Error Correction): Este código recupera la información original directamente de los datos recibidos al añadir redundancia. Las tasas de códigos más comunes para codificación FEC son de $1/2$, $3/4$ y $7/8$. La codificación FEC es muy útil en sistemas de transmisión de datos porque permite corregir los errores sin que sea necesario que la estación transmisora vuelva a enviar la información hacia la receptora.

Capítulo 2

Incidencia de los sistemas de comunicaciones en las aplicaciones de los satélites pequeños

2.1. Introducción

Las misiones tradicionales de satélites son extremadamente caras en cuanto a su diseño, construcción, lanzamiento y operación. En consecuencia, tanto la industria aeroespacial y la comunidad de investigadores han comenzado a dirigir su atención a las misiones de los llamados pequeños satélites. Los programas de pequeños satélites significan una oportunidad para mejorar la industria y brindar entrenamiento a estudiantes en el ámbito espacial, mediante la obtención de experiencia al realizar directamente etapas de una misión especial (diseño, producción, pruebas lanzamiento y operaciones en órbita). Además, actualmente, existen muchas universidades en diversos países que han desarrollado, lanzado y operado sus propios satélites pequeños para fines científicos y educativos.

Las misiones de satélites pequeños son apoyadas por cuatro aspectos básicos[6]:

- Los avances en la miniaturización electrónica, en el procesamiento de datos, inteligencia autónoma y capacidad de rendimiento.

Ventajas	Desventajas
Bajos costos de fabricación y lanzamiento	Generalmente tienen un periodo de vida más corto
Facilidad para la producción en grandes números	Reducida capacidad de transporte debido al hardware empleado
Rápidos tiempos de construcción y mínimas pérdidas financieras en caso de fallas	Solo están visibles en ciertos lapsos de tiempo y salen de órbita mucho más rápido

Tabla 2.1: Ventajas y desventajas de los satélites pequeños.

- La aparición de nuevos lanzadores pequeños en el mercado (estructura especial para cargas útiles auxiliares que permite el lanzamiento simultáneo de varios pequeños satélites).
- La posibilidad de "independencia" en el espacio (los satélites pequeños pueden proporcionar una forma económica de muchos países para lograr diferentes misiones sin depender de las aportaciones de las principales naciones con tecnología espacial).
- Reducción en la complejidad de la misión en curso y los gastos de gestión.

La tecnología de los satélites pequeños ha abierto una nueva era de la ingeniería en satélites al disminuir los costos de misiones espaciales, pero manteniendo un alto rendimiento. Además, algunas aplicaciones pueden ser resueltas de una mejor manera mediante el uso de sistemas distribuidos (constelaciones de pequeños satélites configurados de forma óptima para lograr una cobertura global). Por otra parte, algunas misiones con requisitos estrictos podrían implicar un costo igual o incluso mayor al desarrollar una constelación de pequeños satélites en comparación con un satélite grande. Ciertamente, todo tipo de satélite (ya sea grande o pequeño), tiene sus propias ventajas y desventajas; la Tabla 2.1 muestra algunas de las ventajas y desventajas de los pequeños satélites sobre los satélites grandes.

En este capítulo se pretende describir las diferentes aplicaciones de los satélites pequeños, así como sus necesidades y requerimientos.

Nombre del grupo	Masa [Kg]
Satélites grandes	Mayor a 1 000
Satélites medianos	De 500 a 1 000
Pequeños Satélites	
Minisatélites	De 100 a 500
Microsatélites	De 10 a 100
Nanosatélites	De 1 a 10
Picosatélites	De 0.1 a 1
Femtosatélites	Menor a 0.1

Tabla 2.2: Clasificación de satélites de acuerdo a su masa.

2.2. Clasificación de los satélites

Actualmente se resume lo que es un satélite pequeño con la frase: “Más rápido, mejor, más pequeño, más barato”. Generalmente se incluye tecnología avanzada para proporcionar soluciones innovadoras, permitiendo que se diseñen sistemas satelitales de menor volumen.

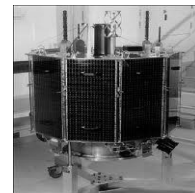
También se utilizan muchos términos para clasificar a los satélites, sin embargo se ha adoptado recientemente una manera general de clasificar a los satélites en términos de su masa desplegada (indicador para el costo y los requerimientos del lanzamiento). La Tabla 2.2 muestra dicha clasificación[19].

Dentro de esta clasificación, el término de “satélites pequeños” se utiliza para cubrir todas las naves espaciales con una masa menor de 500 [Kg].

2.2.1. Minisatélites

En abril de 1999 se lanzó el UoSAT-12, el cual fue el primero en mostrar la capacidad de los minisatélites. Mucha de la tecnología que se utilizó en este proyecto ha sido incorporada a las nuevas generaciones de minisatélites mejorados. Algunas de sus características son:

- Masa arriba de 400 [Kg] (carga útil 150[Kg])
- Estabilización en 3 ejes (combinación de magnetómetros, ruedas inerciales y propulsores N_2)
- Comunicación en banda L/S con una tasa de 1 [Mbps] y potencia promedio de 300 [W]



2.2.2. Microsatélites

En el extremo inferior de la escala (aproximadamente 10 [Kg]), algunos microsatélites normalmente tienen cinco bandejas de módulos apiladas, formando una estructura cúbica con cuatro paneles solares de GaAs montados en el cuerpo del satélite. Cada panel proporciona alrededor de 36 [W] de potencia que es almacenada en una batería recargable de NiCd. Las comunicaciones se realizan mediante enlaces ascendentes/descendentes en banda UHF, VHF, L y/o S (dependiendo de la misión) operando con tasas de transmisión entre 9.6 y 156 [Kbps] y utilizando el protocolo de paquetes AX.25. Este protocolo fue desarrollado a mediados de la década de 1980 por AMSAT como una extensión inalámbrica compatible con el estándar X.25¹ para obtener la habilidad de soportar telemetría, telecomando, archivos de software e información de carga útil sobre un simple enlace duplex de RF.

Debido al precio y al tamaño, los microsatélites tienen control de orientación y estabilización limitado, usualmente se estabilizan pasivamente mediante el alineamiento del campo magnético. El uso de más o menos antenas omnidireccionales significa que pueden llevar acabo su principal función de transpondedores de radio amateur sin la necesidad de tener un control de apuntamiento exacto. Mientras, transpondedores de alta ganancia y cargas útiles para la observación de la Tierra requieren en Tierra una plataforma de apuntamiento; por lo que para un microsatélite típico de 50 [Kg] se puede tener un margen de error de alrededor de 1°, sin embargo recientemente se han utilizado ruedas inerciales que permiten tener una mayor exactitud (alrededor de 0.2°). En el extremo superior de la escala (aproximadamente 100 [Kg]), los microsatélites están basados en el mismo contexto anterior, pero éstos son realizados para misiones que requieren una mayor demanda de carga útil. Sus estructuras de bus de 600x600x500 [mm] permiten acomodar paneles solares más grandes y proveer espacio flexible para la carga útil. Utilizan cuatro paneles solares inclinados de GaAs montados en el cuerpo del satélite, cada panel proporciona alrededor de 38 [W] de potencia promedio. Se tiene un sistema completo de estabilización en 3 ejes, lo que permite que la carga útil tenga una exactitud de apuntamiento mejor que 0.2°. Se tienen enlaces descendentes en banda S a una velocidad de 8 [Mbps].

¹Estándar para redes de área amplia de conmutación de paquetes. X.25 trabaja sobre servicios basados en circuitos virtuales en el cual el usuario piensa que es un circuito dedicado a un sólo ordenador; pero en realidad se comparte con muchos usuarios mediante técnicas de multiplexado, entrelazando paquetes de distintos usuarios de un solo circuito.

2.2.3. Nanosatélites

La tendencia en miniaturizar la tecnología ha alcanzado un interés en el desarrollo de pequeñas y ligeras naves espaciales. Mucho de éste interés ha sido mostrado por EU, entre otros, mediante AFOSR (Air Force Office of Scientific Research) y DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) quienes han impulsado programas de nanosatélites en sus Universidades.

En 1997 fue construido el SPUTNIK-40 (alusivo al 40 aniversario del SPUTNIK) siendo una réplica funcional del original, con una masa de 3 [Kg] fue realizado por estudiantes de Francia. Éste nanosatélite fue seguido por el TUBSAT-N lanzado en 1998 junto con el TUBSAT-N1 realizados por la Universidad de Berlín con una masa de 8 y 3 [Kg] respectivamente. En el 2000 la Universidad de Surrey lanzó el primer nanosatélite de UK, el SNAP-1 con una masa de 6.5 [Kg]. SNAP-1 es un sofisticado nanosatélite con un GPS microminiatura de navegación, un sistema de propulsión miniatura de gas frío y una carga útil de tres videocámaras ultraminiatura CMOS de ángulo amplio y una videocámara CMOS de ángulo estrecho.

Algunas de las aplicaciones futuras para los nanosatélites son: inspección remota de satélites, vigilancia de los sistemas de despliegue en órbita y llevar a órbita pequeños instrumentos científicos que requieren mediciones en el espacio.

2.2.4. Pico y Femto Satélites

El manejo de pequeñas computadoras y equipos móviles de comunicaciones han impulsado más la miniaturización, específicamente en microprocesadores de baja potencia, transmisores eficientes, baterías de alta capacidad y receptores GPS de baja potencia. Recientemente se ha tenido la tendencia de tener una completa integración de electrónica en un sólo chip (System-On-A-Chip), que es particularmente aplicable a la tecnología en picosatélites. En este contexto, la tecnología MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) se vuelve importante, ya que utiliza técnicas de fabricación de circuitos impresos para desarrollar mecanismos electrónicos en miniatura. Por otro lado, se está empleando un esfuerzo considerable en los femtosatélites (masa menor a 10 gramos) con aplicaciones en inspección remota, medidas distribuidas y sensores desechables.

2.3. Aplicaciones de los satélites pequeños

Hoy en día, no se puede hablar de la existencia de un mercado sólido para los satélites pequeños. Los gobiernos de los países siguen siendo el principal apoyo financiero para la comunidad de satélites pequeños. Esta comunidad está todavía vinculada a las actividades de educación e investigación (actividades que se basan en el apoyo del gobierno). Sin embargo, eso no significa que los satélites pequeños tengan aplicaciones limitadas, por el contrario se tienen diversas aplicaciones y se espera que en el futuro incursionen con mayor fuerza en el ámbito comercial. A continuación se mencionan algunas de sus aplicaciones[12, 6].

2.3.1. Satélites de comunicaciones

Los satélites en órbitas LEO² son más cercanos al usuario (en comparación a un geoestacionario) y consecuentemente proporcionan la reducción en las pérdidas de transmisión y en el retardo, además de tener estaciones terrenas más baratas y reuso regional de frecuencias. Sin embargo, las comunicaciones asociadas a constelaciones LEO implican variaciones en el patrón de los enlaces, importantes cambios por efecto Doppler y handover³ de un satélite a otro.

En las dos últimas décadas, varias constelaciones de satélites pequeños LEO se han propuesto proporcionar comunicaciones mundiales usando sólo terminales portátiles para servicios de voz y datos en tiempo real (por ejemplo, Iridium, Globalstar) y también para datps que no son transferidos en tiempo real (por ejemplo, Orbcom, Gemstar).

Es importante mencionar dos ejemplos notables de proyectos de comunicaciones para ámbitos de medicina (telemedicina):

- HealthNet, que emplea un microsátélite (HealthSat) de 60 [Kg] volando en LEO para transmitir datos médicos registrados en varios países de África a América del Norte.
- Telemedicine-Pilot de la Agencia Espacial Colombiana dedicado a la transmisión y recepción de señales de ECG (electrocardiograma). El

²Órbita utilizada por los satélites pequeños, se encuentra en el rango de 160 a 640 [Km] sobre la Tierra.

³Transferencia del servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente.

objetivo principal es evaluar el desempeño de un sistema de telecardiología en internet. El interés principal es acercar los servicios médicos a comunidades de difícil acceso a través de redes de pequeños satélites.

Las comunicaciones móviles por satélite pueden desempeñar un papel importante en los desastres naturales, proporcionando a los equipos de rescate un importante apoyo logístico. Un ejemplo es la DMC (Disaster Monitoring Constellation), una red de siete minisatélites (masa mayor a 100 [Kg]) que proporciona imágenes de emergencia de la Tierra para situaciones de desastre.

2.3.2. Satélites científicos

Los microsátélites y los minisatélites pueden ofrecer una manera barata y rápida de exploración a pequeña escala de objetivos científicos (por ejemplo, detección de rayos X, monitorear el entorno de la radiación espacial, actualizar el campo geomagnético internacional de referencia). Además, jóvenes científicos e ingenieros pueden tener más oportunidades para obtener experiencia en ingeniería satelital y carga útil, la cual se puede escalar a futuras misiones en escalas mayores.

Al menos, cinco microsátélites de la Universidad de Surrey han llevado cargas útiles para monitorear el entorno de radiación cerca de la Tierra. De igual modo, diversos modelos numéricos instalados en Tierra han sido validados con datos de vuelo, y simultáneamente se han hecho mediciones del entorno de radiación y sus efectos inducidos sobre sistemas a bordo. Una misión de colaboración de microsátélites con Chile, FASat-Bravo (1998), llevó cámaras para imágenes de UV (rayos Ultravioletas) y radiómetros de UV como parte del OLME (Ozone Layer Monitoring Experiment), el cual proporcionó datos únicos sobre la concentración y estructura de ozono en las regiones polares de la Tierra.

Muchos científicos, en cuestión de la física solar y plasma espacial, enfatizan la importancia de utilizar grupos coordinados de satélites para obtener medidas de diferentes fenómenos físicos. Un caso particular es el programa International Solar-Terrestrial Physics, el cual involucra la coordinación de información del satélite Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) de la ESA, de las naves espaciales WIND y POLAR de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y de la nave espacial Geotail de ISAS (Institute of Space and Astronautical Science).

2.3.3. Satélites de observación de la Tierra

Los microsátélites han producido una revolución en temas de la observación de la Tierra. Convencionalmente las misiones satelitales de observación de la Tierra y percepción remota son muy costosas; por lo que hay pocas misiones de este tipo y los datos resultantes muestran impresionantes resoluciones espaciales, mientras que se muestra una pobre resolución de objetivos en la Tierra, debido al escaso número de estas naves espaciales actualmente en órbita. Una nueva oportunidad barata para la percepción remota mediante satélites pequeños ha llegado mediante el uso de arreglos CCD (Charge-Coupled Device) que son detectores ópticos de bajo consumo de energía y poderosos microprocesadores utilizados en cámaras de video digitales.

El microsátélite Tsinghua-1 lanzado en junio del 2000, proporcionó imágenes con resoluciones de 35 [m] en cuatro bandas espectrales con la capacidad de $\pm 15^\circ$ (± 200 km) de error de enfoque de las imágenes.

Generalmente, una estación terrena para una misión con satélites pequeños puede estar basada en una simple antena de VHF, (Very High Frequency) por ejemplo los satélites UoSat de la Universidad de Surrey. Pero cuando la misión es sobre Observación de la Tierra, se requiere de la transmisión de amplios volúmenes de información y por ende se requiere una estación terrena más compleja.

2.3.4. Satélites de verificación de tecnología

Los microsátélites también proporcionan un atractivo, de bajo costo y alcance rápido, para demostrar, verificar y evaluar nuevas tecnologías o servicios en un entorno espacial real y dentro de los riesgos aceptables, previo a su escalamiento a satélites más grandes (misiones más caras). Los principales ejemplos diseñados para este tipo de aplicación es la serie de microsátélites STRV-1 (1994) de la Agencia de Defensa de Evaluación e Investigación de UK (ahora conocida como QinetiQ). Por ejemplo, uno de sus experimentos fue probar el rendimiento de las nuevas paneles solares. Los satélites dependen del rendimiento de los paneles solares para la producción de energía primaria para alimentar a los subsistemas y a las cargas útiles a lo largo de la vida útil en órbita; por lo tanto, el conocimiento del comportamiento a largo plazo de los diferentes tipos de paneles solares en el entorno de radiación espacial es esencial. Desafortunadamente, las pruebas de radiación realizadas en Tierra, a corto plazo, no producirán necesariamente datos precisos sobre el desempe-

ño de los diferentes paneles solares puestos en órbita, por ello existen misiones satelitales que persiguen realizar este tipo de pruebas, como la siguiente. En 1991 el UoSAT-5 llevó a un precursor, Solar Cell Technology Experiment (SCTE) diseñado para evaluar el desempeño de una gama de 27 muestras de paneles solares de GaAs, Si y InP en LEO de diversos fabricantes.

2.3.5. Satélites militares

Mucha de la tecnología utilizada para satélites pequeños ha sido manejada por los requerimientos de agencias militares (EU y USSR). Las demandas de satélites de tipo militar parecen no adecuarse a un microsatélite; sin embargo manteniendo bajo el precio y con la rápida respuesta que los caracteriza, se ha desarrollado una versión de satélite con paneles solares desplegados para soportar diferentes cargas útiles militares. La principal diferencia entre una versión comercial y una militar para satélites pequeños son las especificaciones de los componentes y la documentación del proceso, lo que hace tener un factor de incremento de alrededor de 1.5 en cuanto a costo y tiempo con respecto a versiones comerciales. Algunos ejemplos de satélites pequeños y grupos de satélites pequeños empleados en un escenario militar son:

- El programa US Transit, en el cual se usaron satélites pequeños dentro de un sistema de navegación militar.
- La misión US Macsat, en el cual el satélite fue utilizado para sistema de comunicaciones digitales de almacenamiento y reenvío.
- La constelación US Microsat de siete satélites para comunicaciones en campo de batalla.
- La misión Techsat-21, que empleó satélites pequeños para obtener imágenes de radar.

Después de la guerra fría entre EU y la URSS, el primer uso de la plataforma de microsatélites militares fue en la misión Cerise diseñado y construido en Francia, lanzado en LEO en 1995. El Cerise sufrió un accidente al ser impactado por un fragmento de cohete, que afectó su estabilización en 1996. Sin embargo, debido a la flexibilidad de los sistemas de microsatélites, se logró estabilizarlo mediante nuevos algoritmos de control de orientación. Un segundo microsatélite también francés, Clementine, fue puesto en LEO en 1999 y un tercer microsatélite, Picosat fue lanzado con éxito en el 2001 para

EU, llevando tecnología avanzada de cargas útiles para el Departamento de Defensa del país.

2.4. Lanzamiento de satélites pequeños

La mayoría de los satélites pequeños han sido lanzados como cargas útiles secundarias (“piggy back”) que son acompañadas por cargas útiles primarias más grandes y que normalmente son las encargadas de cubrir la mayor parte del costo de lanzamiento. De acuerdo a SSTL (Surrey Satellite Technology Ltd[26]), a continuación se presentan los lanzadores más comunes para satélites pequeños.

2.4.1. Lanzador Ariane

Familia de lanzadores fabricados por Arianespace (consorcio de la ESA). En 1988 desarrolló el ASAP (Ariane Structure for Auxiliary Payloads), una estructura específica, que por primera vez, brindaba oportunidades de lanzamiento alcanzables para microsátélites de 50 [Kg] en LEO. Se encuentra en la categoría HLLV (Heavy Lift Launch Vehicles), brindando una capacidad de carga mayor a los 10 000 [Kg] en LEO.

2.4.2. Lanzador Athena

Lanzador que fue desarrollado por Lockheed Martin Missiles & Space (USA). El primer lanzador falló en 1995, llevando consigo un minisatélite (Vitasat) de GEMStar. En 1997 se lanzó el Athena, permitiendo llevar cargas útiles más pesadas. Se encuentra en la categoría LLV (Large Launch Vehicles), ofreciendo una capacidad de carga de entre 5 000 y 10 000 [Kg] en LEO.

2.4.3. Lanzador Delta

Familia de lanzadores fabricados por Boeing (EU). En 1989 McDonnell Douglas creó el Delta II para la NASA (originalmente diseñado para llevar satélites que conformarían el sistema GPS (Global Positioning System)). Se encuentra en la categoría MLV (Medium Launch Vehicles), brindando una capacidad de carga entre 2 000 y 5 000 [Kg] en LEO.

2.4.4. Lanzador Cosmos

Lanzador desarrollado por AKO Polyot (Rusia). Entre sus lanzamientos destaca el del Unamsat-B en 1996. Se encuentra en la categoría SLV (Small Launch Vehicles), ofreciendo una capacidad de carga menor a los 2 000 [Kg] en LEO.

2.4.5. Lanzador PSLV

El lanzador PSLV (Polar Satellite Launch System) fue desarrollado por la Organización de Investigación Espacial de la India. En 1999 lanzó por primera vez satélites pequeños, el Tubsat (Alemania) y el Kitsat3 (Corea), de forma exitosa. Se encuentra en la categoría MLV.

2.4.6. Lanzador Rocket

Lanzador operado por Eurockot (Alemania y Rusia), y es lanzado desde el Cosmódromo de Plesetsk. Se encuentra en la categoría SLV.

Capítulo 3

Descripción de sistemas de comunicaciones en banda S que se han empleado en satélites pequeños exitosos

3.1. Introducción

La Corporación de Radio Amateur por Satélite (AMSAT) es una organización de voluntarios sin fines lucrativos que diseña, construye y opera satélites experimentales. Trabaja en colaboración con gobiernos, la industria, instituciones educativas y demás sociedades de radioaficionados para impulsar el desarrollo y la educación satelital. AMSAT tiene una participación activa en las misiones espaciales y apoya el seguimiento de satélites LEO que se han desarrollado en colaboración con esta organización.

AMSAT fue formada en Columbia, USA, en 1969 como una organización educativa. Su objetivo era fomentar la participación de radioaficionados en la investigación y comunicación espacial. AMSAT fue fundada para continuar los esfuerzos que había iniciado el proyecto OSCAR (Orbiting Satellite Carrying Amateur Radio), basado en un grupo de la costa oeste de EU que construyó y puso en marcha el primer satélite de radioaficionados, OSCAR-1, el 12 de diciembre de 1961, cuatro años después del lanzamiento del Sputnik.

Por casi 42 años AMSAT ha desempeñado un papel clave en lograr un avance significativo del estado del arte en la ciencia, educación y tecnología

espacial. Sin lugar a dudas, el trabajo que hacen los voluntarios de AMSAT en todo el mundo seguirá teniendo gran alcance, efectos positivos sobre el futuro de los radioaficionados, así como de otras actividades gubernamentales, científicas y comerciales[2].

Por otro lado, SSTL (Surrey Satellite Technology Ltd) es una empresa británica independiente dentro del grupo EADS Astrium NV (European Aeronautic Defence and Space Company). En la década de 1970, SSTL cambió la economía espacial cuando fue pionera en tecnología satelital COTS (Commercial Off The Shelf); éste proceso hizo que la tecnología de consumo normal se adaptará al ambiente espacial.

SSTL puede construir y lanzar satélites con cualquier carga útil por debajo de los 1 000 [Kg], ofreciendo soluciones diseñadas específicamente de acuerdo a las necesidades de la misión; ofrece soluciones completas para misiones como percepción remota, científica, navegación y comunicaciones. Además de brindar capacitación espacial, proveer subsistemas y construir e instalar infraestructura en tierra.

Por casi 25 años SSTL ha estado ofreciendo soluciones para diferentes misiones de satélites pequeños[21].

Por su parte, ISIS (Innovative Solutions In Space) es una compañía privada fundada el 6 de enero del 2006. Los fundadores de la empresa se originan del proyecto de nanosatélite Delfi-C3 de la Universidad Tecnológica de Delft en Holanda. ISIS combina una serie de especialidades técnicas en el campo del diseño de satélites con un enfoque en ingeniería de sistemas.

ISIS trabaja con la visión de acercar el espacio a la Tierra, mediante la miniaturización de la electrónica y tecnologías de vanguardia del sector de las telecomunicaciones, lo que le permite a los satélites y a los sistemas basados en el espacio ser diseñados y desarrollados de una manera diferente. A partir de éstos avances tecnológicos y en combinación con un creciente número de posibilidades de lanzamiento de satélites pequeños, es posible que los sistemas espaciales y las misiones sean más accesibles para un mayor número de usuarios.

ISIS desarrolla subsistemas en miniatura para satélites que cumplan con los requisitos del cliente; además de mantener, estimular y ampliar una posición estratégica en el ámbito de pequeños satélites (subsistemas y misiones)[29].

El propósito del presente capítulo es brindar información sobre algunos satélites pequeños que han utilizado de forma exitosa comunicaciones en banda S, así como conocer las características de los equipos de comunicación empleados (ya sean de las compañías descritas o por integración propia).

3.2. Microsatélite MOST

El satélite MOST (Microvariability and Oscillations of STars) fue desarrollado por UTIAS (University of Toronto Institute for Aerospace Studies) dentro del programa de Pequeñas Cargas Útiles de la Agencia Espacial Canadiense, con la misión de llevar a cabo observaciones de fotometría estelar de larga duración en el espacio. Para realizar dicha misión, MOST incorpora en un diseño de microsatélites, un telescopio óptico de alta precisión fotométrica y un sistema de control de orientación (ACS) que brinda una mayor precisión de apuntamiento al satélite. MOST fue lanzado exitosamente en junio del 2003 en el lanzador Rockot (en Plesetsk, Rusia).

La computadora central del modelo del satélite está basada en un procesador V53, utiliza un cristal cuya frecuencia se incrementó de 9 [MHz] a 29 [MHz] para cubrir las demandas de procesamiento de la misión. Se interconecta con el resto del satélite a través de una tarjeta de interfaz personalizada que proporciona la energía; las conexiones de entrada y salida son digitales de forma serial. Las principales funciones de la computadora central son: la recepción, ejecución y distribución de los comandos y/o actualizaciones que son subidas desde Tierra, así como la adquisición y transmisión de datos a la Tierra.

En la figura 3.1 se muestra el diseño del MOST[32].

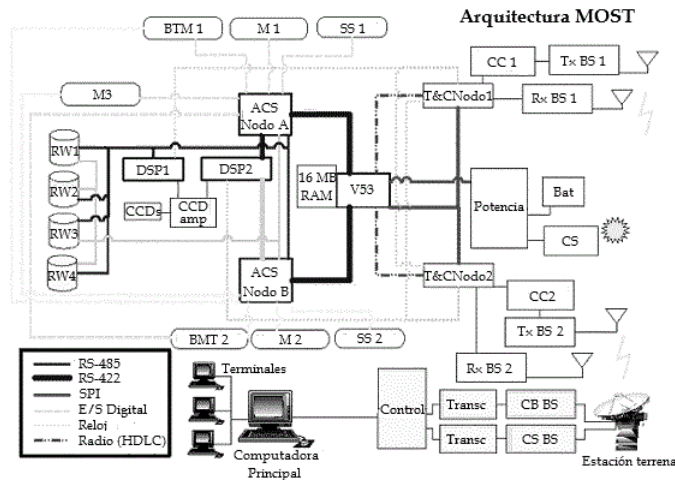


Figura 3.1: Arquitectura del microsatélite MOST.

MOST emplea dos transmisores de RF de 0.5 [W] de salida con una modulación BPSK y dos receptores de FM con 2 [W]; todos los radios operan en banda S. Se tiene un margen suficiente para el enlace descendente mediante el uso de un codificador convolucional (CC). En el enlace ascendente, los receptores de FM ofrecen un medio de comunicación simple, robusto y de bajo costo para enlazar con el satélite. Ambos receptores y transmisores se conectan a los nodos de telemetría y comando (T&C) que sirven como módems y dispositivos de adquisición de datos para la telemetría. Para mantener una cobertura omnidireccional, cada par receptor/transmisor se encuentra en ambos lados del satélite, operando en su propia frecuencia y conectados a antenas cuadrifilares.

Sus tres estaciones terrenas están basadas en transceptores (Transc) BPSK que trabajan en frecuencias de radioaficionados, VHF y UHF. Dichas estaciones se mejoran utilizando convertidores de frecuencia para pasar a banda S (CB BS para el de bajada y CS BS para el de subida), y después son conectados a una antena parabólica de 2 [m] de diámetro (para el enlace descendente) y a una antena Yagi de 45 elementos (para el enlace ascendente). Las antenas están montadas en un rotor controlado, en una torre de 6 [m] de alto.

Los radios en las estaciones terrenas están conectados a un controlador (combinación de módem y un controlador serial de comunicaciones), que a su vez está conectado a un equipo que coordina múltiples terminales, cada una funcionando a través de una interfaz de software para componentes específicos en el satélite.

3.3. Nanosatélite CAN-X2

CAN-X2 fue desarrollado en el SFL (Space Flight Laboratory) de UTIAS dentro del programa Canadian Advanced Nanospace eXperiment (CAN-X), con la misión de apoyar los alcances que se pueden obtener en el espacio con el uso de dispositivos de tamaño pequeño y bajo consumo de energía. Las tecnologías a probar incluyen: un nuevo sistema de propulsión, radios personalizados, nuevos sensores y actuadores para el control de orientación, y un receptor GPS. Para evaluar éstas tecnologías, el CAN-X2 incorpora diferentes experimentos: un experimento con un radio GPS para caracterizar la parte superior de la atmósfera, un espectrómetro para medir los gases del efecto invernadero en la atmósfera, un experimento en una red de comuni-

caciones y un experimento de materiales espaciales. La Figura 3.2 muestra el CAN-X2, que fue lanzado exitosamente en abril del 2008 en el lanzador PLSV-C9 (en Satish Dhawan Space Center, India)[32].

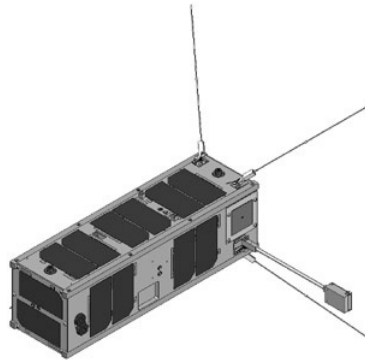


Figura 3.2: Nanosatélite CAN-X2.

El subsistema de comunicaciones en CAN-X2 es un sistema full-duplex que utiliza un transceptor operando en la frecuencia UHF para el enlace ascendente y un transmisor en banda S para el enlace descendente. Este sistema de comunicaciones fue desarrollado en el SFL y es capaz de trabajar con tasas de transmisión de entre 32 y 256 [Kbps] en el enlace descendente y hasta 4 [Kbps] en el enlace ascendente. La antena de UHF consta de un arreglo de cuatro monopolos inclinados que son desplegados en el momento de la expulsión del satélite y proporciona casi una cobertura omnidireccional. El satélite cuenta con un sistema de control de apuntamiento que permite tener una exactitud de apuntamiento de $\pm 10^\circ$ y mantiene una estabilidad de apuntamiento de $\pm 1^\circ$.

3.4. Nanosatélite Deli-Next

Delfi-Next fue desarrollado por TU Delft (Delft University of Technology) dentro del programa Delfi, con la misión de implementar avances tecnológicos con respecto a su anterior CubeSat, el Delfi-C3, y permitir una demostración tecnológica de 2 cargas útiles. Dentro de dichas implementaciones se incluyen: un sistema de control de orientación más avanzado, un transmisor experimental en banda S que permite una mayor tasa de transferencia de datos en el

enlace descendente (se considera útil para misiones que requieran importantes volúmenes de datos), un subsistema de potencia con almacenamiento de energía a bordo (esto permitirá operar en eclipses y un consumo temporal de alta potencia), un sistema de control más robusto, con menos errores y más tolerancia a fallos que en Delfi-C3. Las 2 cargas útiles comprenden un sistema de micro-propulsión llamado $T^3\mu PS$ desarrollado por TNO en cooperación con TU Delft y la Universidad de Twente, y un transceptor de alta eficiencia configurable en órbita llamado ITRX desarrollado por ISIS BV, en colaboración con TU Delft y Systematic BV sistemática llamado ITRX. Además, se incluye el probar un receptor experimental de muy baja frecuencia como precursor para el programa OLFAR (Orbiting Low Frequency Antennas for Radio Astronomy).

El subsistema de comunicaciones de Delfi-Next se compone de tres radios, un circuito desfasador y antenas. La Figura 3.3 proporciona una visión general de los elementos que lo componen[25].

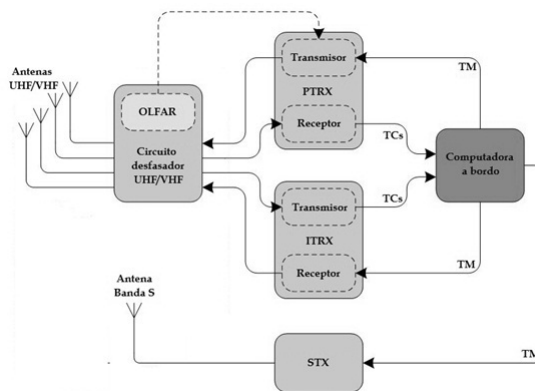


Figura 3.3: Subsistema de comunicaciones del Delfi-Next.

El transceptor primario (PTRX) es el radio utilizado para las operaciones nominales. El segundo radio es el ITRX que es una de las cargas útiles, que también actúa como un radio de respaldo para el PTRX. Ambos utilizan el mismo circuito desfasador y las mismas antenas. El tercer radio es un transmisor en banda S con su propia antena. Esta radio es experimental y se utiliza para probar un enlace punto-a-punto para tasas de transferencia de datos relativamente más altas.

El PTRX, en su enlace ascendente, opera en banda UHF alrededor de la frecuencia de 435 [MHz] con una tasa de transferencia de datos fija en 1

200 [bps]. Éste radio también está listo para que en su enlace ascendente se puedan enviar paquetes completos de software para los microcontroladores locales como los de la computadora a bordo y el sistema de control de orientación. El enlace descendente del PTRX trabaja en la banda VHF alrededor de la frecuencia de 145 [MHz] con una tasa de transferencia de datos fija en 2 400 [bps], cubriendo con todos los requisitos de las cargas útiles y de los experimentos. La potencia de salida del transmisor del PTRX es de 0.2 [W]. Incluyendo todas las pérdidas del cableado y de la antena, la PIRE de salida transmitida es -14.8 [dBW]. En una órbita circular de 800 [Km] a una elevación mínima de 10^0 , se alcanza un BER de 10^{-6} con antenas de por lo menos 2 [dB] de ganancia en la estación terrena. Esto permite que muchos radioaficionados puedan participar en la recepción de datos con antenas simples.

El transmisor experimental en banda S (STX) trabaja en la frecuencia de 2.4 [GHz] y se utiliza para desarrollar tecnología en nanosatélites que permita tener tasas de transferencia de datos más altas para alcanzar altos volúmenes de datos en el enlace descendente. Para hacer este enlace más útil y no sólo experimental, todos los datos enviados al PTRX también se almacenan en el STX. El STX puede ser solicitado para enviar los paquetes que se hayan perdido debido a las ventanas de tiempo específico en donde la estación terrena no es capaz de recibir telemetría. Éste búfer de datos se encuentra en el STX en lugar de la computadora a bordo porque en el STX se pueden tener mayores tasas de transferencia de datos a través del bus de datos *I²C*. Como la tasa de transferencia de datos máxima que se puede lograr es linealmente dependiente de la cantidad de potencia de salida y la cantidad total de potencia al STX es limitada, la eficiencia del amplificador de potencia es un factor importante.

En la Figura 3.4 se pueden observar las antenas utilizadas en el Delfi-Next.

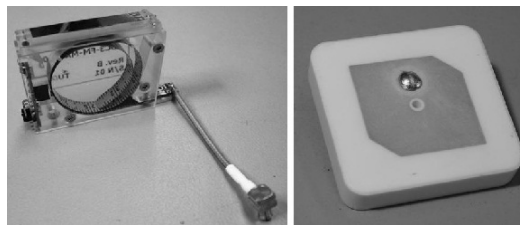


Figura 3.4: Antena UHF/VHF (lado izquierdo) y antena de parche para banda S (lado derecho).

3.5. Sistema de comunicaciones en banda S del SSTL para satélites pequeños

SSTL ofrece un sistema de comunicaciones completo en banda S para comando, telemetría y enlace descendente para carga útil. Considera dos tipos de antenas: Parchada y Cuadrifilar, las cuales son utilizadas de acuerdo a los requerimientos de cobertura que se necesiten. Algunos de los satélites pequeños que han utilizado dicho sistema de manera exitosa son:

- AlSat 1: Microsatélite desarrollado en colaboración con CNTS (Centre National des Techniques Spatiales) para el programa DMC (Disaster Monitoring Constellation) con la misión de Observación de la Tierra. Fue lanzado en el 2002 en el lanzador Cosmos en Plesetsk, Rusia.

- UK-DMC: Microsatélite desarrollado en colaboración con UK Space Agency y DMC International Imaging para el programa DMC con la misión de Observación de la Tierra. Fue lanzado en el 2003 en el lanzador Cosmos en Plesetsk, Rusia.

- NigeriaSat 1 y 2: Microsatélites desarrollados en colaboración con NASR-DA (National Space Research and Development Agency) para el programa DMC con la misión de Observación de la Tierra. El primero fue lanzado en el 2003 en el lanzador Cosmos en Plesetsk, Rusia; mientras que el segundo fue lanzado en el 2010 en el lanzador Dnepr en Yasny, Rusia.

- Deimos 1: Microsatélite desarrollado en colaboración con Deimos Imaging para el programa DMC con la misión de Observación de la Tierra. Fue lanzado en el 2009 en el lanzador Dnepr en Baikonur, Kazajistán.

La Figura 3.5 muestra un diagrama de bloques del sistema de comunicaciones.

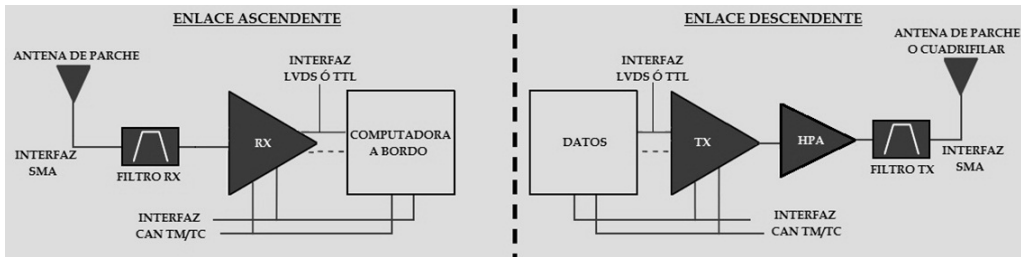
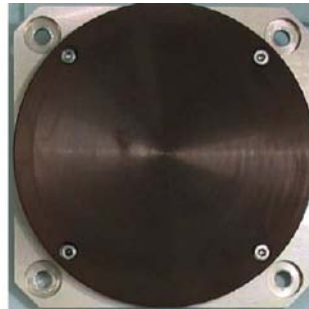


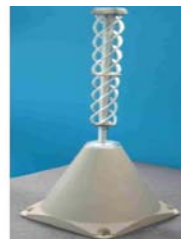
Figura 3.5: Sistema de comunicaciones en banda S del SSTL para satélites pequeños.

A continuación se presenta la descripción de los componentes que conforman el sistema de comunicaciones[21].

Antena de parche
En enlace ascendente: Telecomando En enlace descendente: Telemetría y Carga útil
Potencia: Arriba de 10 [W] Ganancia: 7 [dBi] Tasa de transmisión: Arriba de 4 [Mbps]
Polarización: RHCP ó LHCP $\theta_{-3dB} = \pm 35^\circ$
Rango de frecuencia: 2.0 a 2.5 [GHz] Dimensiones: 82x82x20 [mm ³], masa: 80 [g]



Antena cuadrifilar
En enlace descendente: Telemetría y Carga útil
Potencia: Arriba de 10 [W] Tasa de transmisión: Arriba de 10 [Mbps]
Polarización: RHCP ó LHCP $\theta_{-3dB} = 120^\circ$
Rango de frecuencia: 2.200 a 2.290 [GHz] Dimensiones: 100x100x500 [mm ³] Masa: 500 [g]



Filtro Rx
Rango de frecuencia: 2.200 a 2.290 [GHz] Ancho de banda: 80 [MHz]
Pérdidas de inserción: < 1.5 [dB] Banda de rechazo: > 60 [dB]
Dimensiones: 46x98x19 [mm ³], masa: 90 [g]



Receptor (Rx)
Rango de frecuencia: 2.025 a 2.100 [GHz] (deriva del sintetizador < 3 [KHz])
Modulación: CPFSK Codificación: Diferencial
Tasa de transmisión: 9.6 ó 19.2 [Kbps] Sensibilidad (BER 10 ⁻⁵): -113 ó -110 [dBm]
Alimentación: 28 [V] Dimensiones: 190x135x60 [mm ³], masa: 1.3 [Kg]



Transmisor (Tx)
Rango de frecuencia: 2.2 a 2.3 [GHz] (< ±20 [ppm])
Modulación: BPSK, QPSK Codificación: Diferencial y Convolutional
Tasa de transmisión: 9.6 [Kbps] a 8 [Mbps] Potencia de salida: Arriba de 4 [W] utilizando un HPA adicional
Alimentación: 15 - 50 [V] Dimensiones: 200x191x80 [mm ³], masa: < 2 [Kg]



HPA
Rango de frecuencia: 2.2 a 2.3 [GHz] Alimentación: 28 [V]
Potencia: 2 ó 4 [W] Ganancia: 10.75 [dB] / 26 [dB]
Dimensiones: 35x135x190 [mm], masa: 0.8 [Kg] 57x135x190 [mm ³], masa: 1.250 [Kg]



Filtro Tx
Rango de frecuencia: 2.200 a 2.280 [GHz] Ancho de banda: 80 [MHz]
Pérdidas de inserción: < 1.5 [dB] Banda de rechazo: > 60 [dB]
Dimensiones: 43x103x19 [mm] ³ , masa: 90 [g]



La estación terrena que ofrece SSTL para comunicaciones en banda S está compuesta por un reflector parabólico con diámetro de 3 [m].

3.6. Sistema de comunicaciones en banda S de ISIS para satélites pequeños

ISIS ofrece un sistema integrado de comunicaciones en banda S para Pico y Nano satélites (HISPICO, Highly Integrated S-band system for PICO and nano satellites) en enlace descendente para carga útil. Considera tres partes; el transmisor, el receptor y las antenas. La Figura 3.6 muestra este sistema.

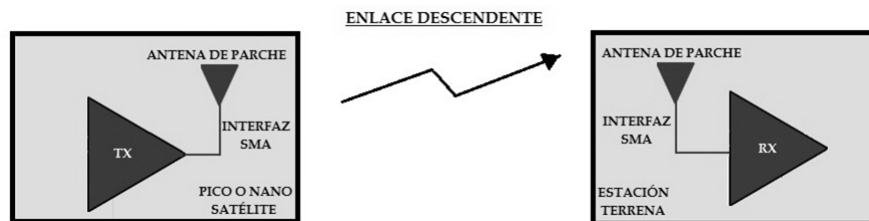


Figura 3.6: Sistema de comunicaciones en banda S de ISIS.

Descripción de los componentes que conforman el sistema de comunicaciones[29].

Transmisor (Tx)
Rango de frecuencia: 2.2 a 2.3 [GHz] Tasa de transmisión máxima: 1.06 [Mbps]
Modulación: DQPSK Codificación: Turbo-código
Potencia de salida: 500 [mW] Alimentación: 3 - 5 [V]
Dimensiones: 95x46x15 [mm ³], masa: 75 [g]
Antena de parche
Potencia: Arriba de 10 [W] Ganancia: 6 [dBi]
Polarización: RHCP Ancho de banda (3 [dB]): 50 [MHz] (aprox.)
Rango de frecuencia: 2.2 a 2.3 [GHz] Dimensiones: 50x50x3.2 [mm ³]
Receptor (Rx)
Rango de frecuencia: 2.2 a 2.3 [GHz] Tasa de transmisión máxima: 1.06 [Mbps]
Modulación: DQPSK Codificación: Turbo-código
Alimentación: 12 - 15 [V] Sensibilidad (BER 10 ⁻⁵): -100 [dBm]
Dimensiones: 150x180x30 [mm ³] Masa: 1.3 [Kg]

La estación terrena que ofrece ISIS para comunicaciones en banda S es compatible con GENSO y está compuesta por un reflector parabólico con una ganancia de 21 [dBi] con polarización RHCP o LHCP. También cuenta con un convertidor de frecuencia de bajo ruido con modulación BPSK[7].

Capítulo 4

Radio Mobile, software para simular la propagación de señales de microondas

4.1. Introducción

La propagación de ondas de radio es un fenómeno cuyas propiedades son difíciles de predecir. Esto se vuelve más importante en VHF, UHF y SHF (señales de microondas) donde las colinas, árboles, casas y la constantemente cambiante atmósfera proporcionan dispersión en obstáculos que son comparables en tamaño a la longitud de onda. Para el diseño del sistema y del equipo a utilizar, no se cuenta con una manera precisa de conocer las características de propagación en el canal y cómo afectarán la operación, por lo que es necesario basarse en uno o más modelos de propagación que intenten describir como el mundo físico afecta el flujo de energía electromagnética.

Uno de los modelos de propagación más reciente es el modelo ITS Irregular Terrain Model (Longley-Rice)¹, que es un modelo de predicción troposférica para transmisión de radio sobre terreno irregular en enlaces de largo-medio alcance. Este modelo de propagación permite trabajar con ciertos parámetros que son mencionados más adelante.

Radio Mobile es un software libre para el cálculo de enlaces de radio de larga distancia en terreno irregular que implementa el modelo Longley-Rice. Éste programa utiliza perfiles geográficos de la zona de trabajo combina-

¹Publicado por el ITS (Institute for Telecommunications Science) en EU.

dos con la información de los equipos (potencia, sensibilidad del receptor, características de las antenas, pérdidas, etc.) que se desea simular.

Radio Mobile posee múltiples utilidades de apoyo para la simulación de los enlaces y para el diseño de equipos y del sistema de telecomunicaciones. Los parámetros a introducir para realizar las simulaciones permiten reflejar de forma fiel los equipos reales que se piensa utilizar en la instalación para la que estarían destinados. Para el diseño específico de enlaces de radio se utiliza un modelo punto a punto.

En la página de Radio Mobile <http://www.cplus.org/rmw/> (Figura 4.1) existe un enlace directo a la página de descargas de Internet, donde se puede bajar un paquete de archivos para instalar el software; dicho software está disponible en distintos idiomas. Esta página además incluye una guía de instalación rápida (la instalación es sencilla). La página contiene, además, una sección de preguntas frecuentes con respuestas para las dudas más habituales y explicaciones de uso.



Figura 4.1: Página oficial de Radio Mobile.

La última versión disponible del software en la página de Radio Mobile es la 11.0.5 (consultada el 10/Mayo/2011) y puede ser actualizada en línea.

El objetivo del presente capítulo es describir el software que se utilizará para la simulación de enlaces. Dentro del contenido se destacarán los parámetros de entrada y salida, así como el modelo de propagación en el que está basado este software.

4.2. Parámetros de entrada

Los parámetros que son requerido por el modelo Longley-Rice y, por ende, por Radio Mobile se dividen en cuatro grupos. La Tabla 4.1 muestra dichos parámetros[17].

Parámetros del sistema	
Frecuencia	20 [MHz] a 20 [GHz]
Distancia	1 a 2 000 [m]
Potencia de Tx	10 [nW] a 1 [MW]
Sensibilidad de Rx	0.01 a 2 000 [μ V]
Pérdidas de la línea	0 a 500 [dB]
Ganancia de la antena	-10 a 100 [dBi]
Rango de alturas	arriba de 30 000 [m]
Polarización de la antena	vertical u horizontal
Parámetros ambientales	
Parámetro de irregularidad del terreno, Δh	
Permitividad y Conductividad	
Refractividad de la superficie, N_S	250 a 400 [unidades N]
Cima	7 opciones
Parámetros de implementación	
Criterio de ubicación	Aleatorio, cuidadoso
Parámetros estadísticos	
Confiability	0.1 a 99.9 %

Tabla 4.1: Parámetros de entrada para el modelo ITS/Radio Mobile.

4.2.1. Parámetros del sistema

Los parámetros del sistema son aquellos que están relacionados directamente al sistema de comunicación involucrado y que son independientes al ambiente. Es importante mencionar que la frecuencia es la frecuencia de la portadora, la distancia se refiere a la longitud del trayecto entre las dos terminales, la altura de la antena es de cada terminal y se mide por encima del suelo, las pérdidas de la línea promedio son de 0.5 [dB] y se asume que la polarización de las antenas en ambas terminales es la misma.

4.2.2. Parámetros ambientales

Los parámetros ambientales son aquellos que describen el ambiente en el cual el sistema va a operar. Sin embargo, son independientes del sistema.

4.2.2.1. Parámetro de irregularidad del terreno

El parámetro de irregularidad del terreno, Δh , se refiere al terreno que separa ambas terminales y es tratada como una función aleatoria de la distancia entre las terminales. Para caracterizar esta función aleatoria el modelo ITS utiliza un valor Δh para representar de manera sencilla el tamaño de las irregularidades, dicho valor es el rango promedio de las elevaciones y los valores sugeridos se muestran a continuación en la Tabla 4.2.

	Δh [m]
Plano (agua tranquila)	0
Llanos	30
Colinas	90
Montañas	200
Montañas toscas	500
Terreno promedio	90

Tabla 4.2: Valores sugeridos para Δh .

4.2.2.2. Permitividad y Conductividad

Tanto la permitividad relativa o constante dieléctrica del medio y la conductividad tienen valores típicos sugeridos que se muestran en la Tabla 4.3.

	Permitividad Relativa	Conductividad [S/m]
Tierra promedio	15	0.005
Tierra pobre	4	0.001
Tierra buena	25	0.020
Agua fresca	81	0.010
Agua de mar	81	5.0

Tabla 4.3: Valores sugeridos para permitividad y conductividad.

4.2.2.3. Refractividad de la superficie

La refractividad de la superficie, N_S , determina la curvatura que sufrirán las ondas de radio al propagarse. Las constantes atmosféricas, y en particular la refractividad de la atmósfera, debe de ser tratada como una función aleatoria de la posición y del tiempo. Para la mayoría de los propósitos ésta función aleatoria puede ser caracterizada por el simple valor N_S que representa el valor normal de la refractividad cerca de los niveles terrestres; usualmente se mide en unidades N (partes por millón), los valores sugeridos son mostrados en la Tabla 4.4.

4.2.2.4. Clima

Existen 7 tipos de clima que junto con N_S sirven para caracterizar la atmósfera y su variabilidad en el tiempo. Los climas disponibles se presentan en la Tabla 4.4.

Clima	N_S [unidades N]
Ecuatorial	360
Subtropical Continental	320
Subtropical Marítimo	370
Desierto	280
Templado Continental	301
Templado Marítimo, sobre la tierra	320
Templado Marítimo, sobre el mar	350

Tabla 4.4: Climas y valores sugeridos para N_S .

Es importante mencionar que para condiciones atmosféricas promedio se utiliza un clima Templado Continental y un $N_S = 301$ [unidades N].

4.2.3. Parámetros de implementación

Los parámetros de implementación tratan de caracterizar las interacciones de las terminales dentro de un cierto tipo de ambiente. El modelo ITS ha previsto dicha interacción para cada terminal.

- Criterio de ubicación: Una descripción cualitativa del cuidado con el cual cada terminal es colocada en terrenos altos.

4.2.4. Parámetros estadísticos

Los parámetros estadísticos son aquellos que describen el tipo y variedad de estadísticas que el usuario desea obtener, y es expresada en términos de la confiabilidad.

4.3. Descripción de Radio Mobile

Es importante mencionar algunos conceptos que maneja Radio Mobile[24]:

- **Unidad:** Se refiere a las terminales pertenecientes a la red. Es decir, las unidades Unidad 1, Unidad 2,..., Unidad N contienen las coordenadas de las terminales entre las que se establecen los enlaces. Para que resulte sencillo trabajar con ellas, se pueden incluir iconos, el nombre del lugar real, etc.
- **Red:** Se refiere a la información de la red. Los enlaces establecidos, los equipos de transmisión y recepción, etc.
- **Sistemas:** Se refiere al sistema que guardará la información de los equipos que se quiere simular en una unidad. Por ejemplo, un Sistema 1 genérico tiene una antena situada a 12 [m] de altura, un transmisor de 200 [mW] con receptor de sensibilidad -93 [dBm], pérdidas de los conectores para sus equipos de 3 [dB], etc. Este sistema a la hora de diseñar la red, se puede asociar a una Unidad para que en ese lugar se simule que están funcionando equipos con esas características.

4.3.1. Ficheros

En Radio Mobile existen varios tipos de ficheros que guardan para una misma red diferentes tipos de información. Es importante entender que RadioMobile necesita cargar mapas sobre las locaciones para la simulación, de lo contrario no funcionará. Para entender dicho proceso, se mencionan los siguientes ficheros:

- **Ficheros.map:** Son los ficheros que contienen la elevación de los mapas. Es la base con la que se cargan los perfiles del terreno.
- **Ficheros.bmp:** Son los ficheros que contienen imágenes (imágenes de los mapas asociados a las elevaciones y otro tipo de mapas).

- **Ficheros.net:** Son los ficheros que guardan la información de la red diseñada (unidades, redes, equipos, enlaces establecidos, etc.).

Al ejecutar el programa aparece una pantalla similar a la mostrada en la Figura 4.2.

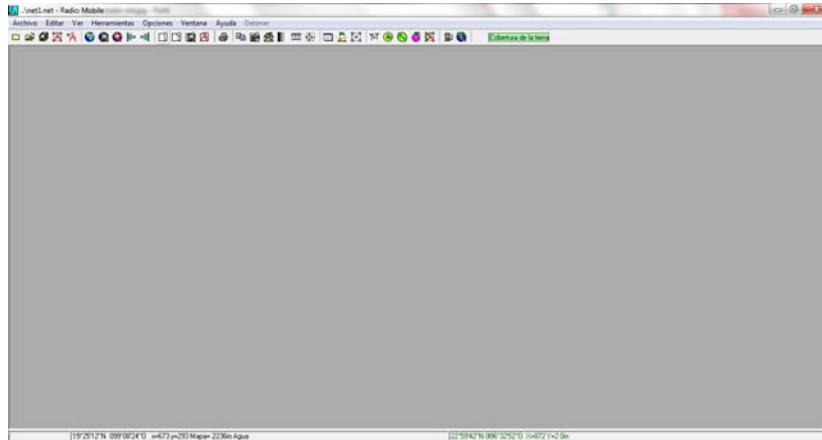


Figura 4.2: Ventana de inicio de Radio Mobile.

4.3.2. Menú Archivo

El menú *Archivo* despliega la siguiente información:

- **Nuevas redes:** Carga una nueva red, borrando todos los datos anteriores.
- **Abrir redes:** Carga una red previamente almacenada con el navegador de directorios.
- **Grabar redes:** Guarda la configuración para la red actual con la que se está trabajando, permitiendo la asociación del nombre de la red a los mapas o imágenes asociadas a ésta.
- **Grabar redes como:** Permite nombrar la red diseñada, guardando sus propiedades o los cambios asociados a ésta.
- **Propiedades de redes:** Lanza la ventana de configuración de redes.
- **Propiedades de la unidad:** Lanza la ventana de configuración de las unidades.

- Abrir mapa: Carga un mapa de altitudes.
- Grabar mapa como: Guarda el mapa de altitudes actualmente cargado con el nombre que se le quiera dar.
- Propiedades del mapa: Lanza la ventana de configuración de mapas.
- Mapa previo: Carga el mapa anterior al actual, si existiera, de acuerdo a la secuencia de trabajo de la sesión actual.
- Mapa siguiente: Carga el mapa posterior al actual, si existiera, de acuerdo a la secuencia de trabajo de la sesión actual.
- Nueva imagen: Lanza la ventana de configuración de imágenes, para seleccionar las propiedades de una nueva imagen.
- Abrir imagen: Carga una imagen, ya existente, en la ventana en la que estamos trabajando.
- Grabar imagen como: guarda la imagen actualmente cargada con el nombre que se le quiera dar.
- Propiedades de la imagen: Lanza la ventana de configuración de imágenes, para realizar modificaciones.
- Imprimir: Imprime el contenido de la imagen de la ventana actual. Después existen accesos rápidos para las últimas 8 redes con que se trabajó, guardadas por el programa.
- Salir: Permite salir del programa, consultando confirmación y ofreciendo guardar la sesión de trabajo.

4.3.3. Menú Editar

El menú *Editar* despliega la siguiente información:

- Copiar: Realiza una copia de la imagen de la ventana actual de trabajo.
- Pegar: Pega la imagen copiada en la ventana actual de trabajo.
- Pegar como una nueva imagen: Pega la imagen copiada en una nueva ventana de trabajo lanzada automáticamente.

- Combinar imágenes: Lanza la ventana de configuración para la superposición de imágenes de diferentes mapas.
- Dibujar grilla: Dibuja una rejilla con las coordenadas del mapa con que se trabaja, con ejes espaciados según la precisión seleccionada.
- Dibujar anillos: Dibuja círculos concéntricos a un punto seleccionado del mapa, con las distancias a éste para diferentes posibilidades de unidades.
- Dibujar objetos: Representa otro tipo de información relativa a la imagen observada, por ejemplo, las ciudades más relevantes.
- Ajustar a la ventana: Ajusta la imagen actual a la ventana de trabajo para que pueda verse completa.
- Rotar/Estirar: Permite rotar, ampliar o reducir la imagen del mapa con que se trabaja en un factor determinado.
- Inundar: Rellena del color seleccionado en la imagen, aquellas zonas que se encuentren por debajo de una determinada altitud.
- Estratificación: Similar al caso anterior, pero marcando un máximo y un mínimo, en lugar de una cota inferior.
- Curvas de nivel: Dibuja las curvas de nivel espaciadas según selección para el mapa cargado.
- Forzar a escala de grises: Muestra la imagen en escala de grises.
- Sombra: Aumenta el factor de sombreado para la imagen seleccionada en función del ángulo de elevación.
- Redibujar ultima leyenda: Vuelve a dibujar la última leyenda cargada.
- Escala de distancia: Añade a la imagen en la esquina seleccionada (superior, inferior / derecha, izquierda) una regla con la escala trabajada.
- Coordenadas en las esquinas: Muestra la leyenda con las coordenadas de las esquinas de la imagen mostrada en esa ventana, independientemente del mapa de altitudes cargado.

- Ajustar la imagen a la imagen/selección: Lanza la ventana de configuración de mapas de elevación, cargado con las características (punto central, distancia, etc.) de la zona seleccionada por el usuario. En caso de no haber selección previa, ajusta el mapa a la imagen actual de la ventana de trabajo.
- Ajustar mapa a las unidades: Similar a la función anterior, solo que ajusta el centrado y distancia necesaria para el mapa, en función de las unidades que estén habilitadas en ese momento.

4.3.4. Menú Ver

El menú *Ver* despliega la siguiente información:

- Grilla de altitud: Muestra la rejilla numérica para las elevaciones, y opcionalmente el zoom de la imagen asociada a esa rejilla numérica.
- Mapa del mundo: Muestra la imagen del mapa del mundo en una nueva ventana que se abre automáticamente.
- Encontrar la mayor altitud: Sitúa el cursor en la localización con mayor altitud para la zona seleccionada.
- Encontrar la menor altitud: Sitúa el cursor en la localización con menor altitud para la zona seleccionada.
- Mostrar redes: Permite diferentes formas de representación de las redes. Existen tres opciones Todo muestra toda la red con unidades y enlaces configurados entre ellas, Unidades muestra solamente las unidades habilitadas para la red y Líneas muestra solo las líneas necesarias asociadas a cada enlace sin las unidades.
- Ocultar redes: Oculta las redes, unidades y enlaces de la imagen mostrada.
- Autore dibujar redes: Dibuja automáticamente las modificaciones de la red.
- Vuelo: Aparece una nueva ventana, la última animación generada con “Enlace de radio”.

- Barra de herramientas: Una vez marcada, muestra la barra de herramientas.
- Barra de estados: Una vez marcada, muestra en la parte inferior izquierda del programa, fuera de la imagen, las coordenadas y altitud para la posición del cursor en ese momento.
- Coordenadas del ratón: Una vez marcada, muestra en la parte inferior derecha, fuera de imagen, contigua a la información anterior, las coordenadas sobre las que se mueve el ratón, no coincidiendo con el cursor que se mantiene fijo en la última posición presionada.
- Pantalla completa: Modo pantalla completa para la imagen de la ventana con que se está trabajando.

4.3.5. Menú Herramientas

El menú *Herramientas* despliega la siguiente información:

- Enlace de radio: Herramienta para el análisis del enlace establecido entre dos terminales.
- Cobertura de radio: Herramienta que representa la cobertura radioeléctrica para la terminal seleccionada. Existen varias opciones: Polar simple que muestra las coberturas en coordenadas polares, Cartesiano combinado que realiza lo anterior en coordenadas cartesianas, Cobertura visual que representa la cobertura visual para la terminal seleccionada, Interferencia que muestra la interferencia del enlace y Fresnel que muestra las zonas Fresnel² del enlace.
- Administrado de red: Lanza la ventana que maneja las redes, unidades y sistemas.
- Editor de objeto: Generador de objetos.
- Visor patrón de antena: Visor de patrones de radiación de las antenas.

²La zona Fresnel es el volumen de espacio en cual la energía de las ondas electromagnéticas se esparce a medida que se aleja del transmisor. El radio de la zona Fresnel es proporcional a la frecuencia e inversamente proporcional a la distancia entre antenas.

- Reporte de red: Genera, con posibilidad de guardar en un fichero, todas las características y resultados para la red con la que se trabaja.
- Monitor multicast: Muestra los últimos mensajes para el canal “multicast” definido en las opciones de GPS.
- Conversión métrica: Esta opción ofrece dos casillas, donde se puede introducir una cantidad en millas para su conversión a kilómetros o viceversa. (1 milla = 1.6093 [Km]).

4.3.6. Menú Opciones

El menú *Opciones* despliega la siguiente información:

- GPS: Lanza la ventana de configuración para la adquisición de información geográfica con GPS.
- APRS: Lanza la ventana de configuración para la adquisición de información del “Automatic Position Reporting System”.
- INTERNET: Configuración de las opciones para descarga de mapas desde Internet. Existen diferentes pestañas dentro de esta configuración, para las diferentes fuentes posibles. (SRTM, Toporama, Terraserver, LANDSAT, etc.)
- Datos de altitud: Gestión del método utilizado para la obtención de los datos para construir los mapas de altitud.

4.3.7. Menú Ventana

El menú *Ventana* despliega la siguiente información:

- Cascada: Presentación de las ventanas en cascada.
- Organizar horizontal: Presentación de las ventanas distribuidas en columnas y filas con expansión horizontal.
- Organizar vertical: Presentación de las ventanas distribuidas en columnas y filas con expansión vertical.

4.3.8. Menú Ayuda

El menú *Ayuda* despliega la siguiente información:

- Contenido: Accede al contenido de la ayuda.
- Buscar: Permite búsquedas en la ayuda.
- Revisar actualización en la web: Conecta con Internet para comprobar si existe alguna actualización posible y la instala.
- Acerca de: Brinda información sobre el programa y muestra los links de descarga.

4.4. Barra de herramientas

En Radio Mobile existen iconos de acceso rápido (que son destinados a las funciones generales del programa) para facilitar la selección de las utilidades, dicho iconos son los que se muestran en la Figura 4.3.

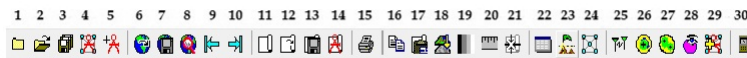


Figura 4.3: Barra de herramientas de Radio Mobile.

Los iconos del 1 al 3 sirven para generar una nueva red, abrir alguna ya existente o guardar la que está abierta, respectivamente.

Los iconos del 4 al 5 son los destinados al acceso rápido a la configuración, el primero es sobre las redes con las que se trabaja, y el segundo sobre las unidades.

Los iconos 6 y 7 sirven para abrir un mapa ya existente, o guardar el mapa cargado en ese momento.

El icono 8 muestra la pantalla de configuración para la generación de mapas.

Los iconos 9 y 10 permiten volver a trabajar con mapas cargados anterior o posteriormente durante el uso del programa en ejecución. Es decir, permite la gestión de la memoria de mapas.

Los iconos del 11 al 14 permiten gestionar el uso de las imágenes generadas para representar los mapas. Las imágenes pueden ser cualquier tipo de

mapa, y no llevan asociada información de las altitudes. Es decir, solamente son mapas de bits de la zona representada que puede guardarse de forma separada.

El icono 15 imprime todo lo que se esté viendo en ese momento en la ventana con que se esté trabajando. Los iconos 16 y 17 guardan el dibujo con la red superpuesta, debido a que cuando se guarda una imagen, se guarda sólo el dibujo.

El icono 18 permite la carga de varios mapas a la vez, mientras que el icono 19 permite forzar la imagen actual a escala de grises y el icono 20 añade a la ventana la escala con la cual se está trabajando.

El icono 21 lanza la pantalla de configuración de mapas, con los datos de la ventana seleccionada manualmente, con el ratón.

El icono 22 muestra en pantalla una rejilla con la información acerca de las altitudes del punto central y los alrededores, y el icono 23 permite encontrar el punto de mayor elevación en una zona.

El icono 24 carga las redes en pantalla, actualizando las posibles modificaciones que se hayan podido realizar en pasos anteriores. Refresca tanto las unidades, como las redes y los enlaces entre éstas.

El icono 25 lanza la ejecución de la utilidad que nos permite el estudio del enlace, cargando por defecto la última selección de terminales y la actualización de los datos, o nuevas modificaciones de la red si existieran.

Los iconos del 26 al 28 muestran las diferentes representaciones de la cobertura de las terminales.

El icono 29 administra la red y el icono 30 muestra opciones de GPS.

4.5. Configuración de la red

En el menú *Archivo* se selecciona la opción Nuevas redes y aparece una ventana como la mostrada en la Figura 4.4.

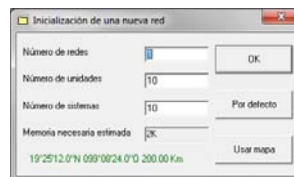


Figura 4.4: Ventana de Radio Mobile para una nueva red.

Para la inicialización de la red con la que se va a trabajar, se tiene que introducir el número de redes (enlace o cadena de enlaces), número de unidades y número de sistemas de las que se quiere disponer. Con estos datos el programa estima la cantidad de memoria necesaria. Los números límites son: 50 redes, 1000 unidades y 255 sistemas.

Si se pulsa el icono Usar mapa, lo cargará inicialmente referido al mapa anterior con el que se haya trabajado. No obstante, se podrá cargar el mapa deseado en pasos posteriores. Si se pulsa el icono *Por defecto* entonces se cargan los valores por defecto establecidos (25 / 50 /25). Para cargar los datos en la red, en el menú Archivo se selecciona la opción Propiedades de las redes y el programa lanza la ventana de configuración mostrada en la Figura 4.5.

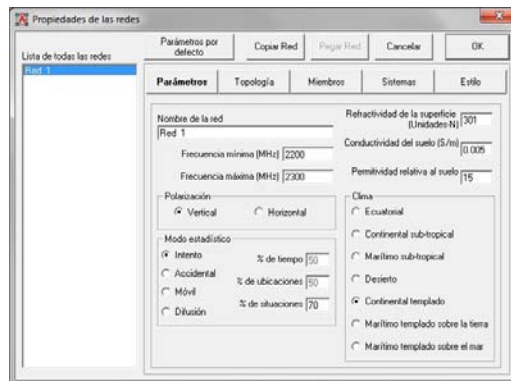


Figura 4.5: Ventana de configuración de la red.

La columna de la izquierda describe los enlaces pertenecientes a la red. La fila superior da acceso a diferentes pasos de la configuración de red:

- Parámetros por defecto: Fija los parámetros por defecto del programa.
- Copiar red y Pegar red: Copia y pega enlaces.
- Parámetros: Carga los parámetros generales y particulares del modelo ITS para caracterizar el entorno de propagación, los cuales fueron mencionados en la descripción del modelo.
- Topología: Define la topología de la red. La casilla visible se marca si se quiere que el enlace sea visible. Existen tres tipos de topología: Red

de Voz (Controlador/Subordinado/Repetidor), Red de Datos topología estrella (Maestro/Esclavo), Red de Datos cluster (Nodo/Terminal).

- **Miembros:** Define el número de terminales pertenecientes a la red, así como sus sistemas y su papel dentro de ésta según la topología. Aparece una ventana de configuración donde se muestra la lista de unidades que contiene las terminales que se pueden seleccionar para el enlace. Se pueden seleccionar tantos elementos como se desee, es decir, enlaces punto a punto o multipunto. En cada unidad seleccionada se debe determinar el rol de la unidad, que es el comportamiento o función de la terminal dentro de la topología de la red (por ejemplo: esclavo, repetidor, terminal, etc.). También se encuentra una sección importante para el análisis, la cual se llama *Dirección de la antena*; aquí es donde se pueden manipular las antenas, se puede apuntar directamente hacia alguna unidad en específico ó, mediante la opción *Fijo*, manipular más exactamente la antena con los espacios de azimuth y elevación donde se pueden ingresar valores deseados y ver como se afecta el patrón de radiación de la antena.
- **Sistema:** Define los equipos utilizados en el enlace. En esta sección se definen las características del equipo a utilizar (potencia de transmisión, sensibilidad de recepción, pérdida de la línea, tipo de antena, altura de la antena, ganancia de la antena y pérdidas adicionales del cable).
- **Estilo:** Define cómo se quiere que se presenten los resultados. La ventana de configuración aparece en la Figura 4.6.

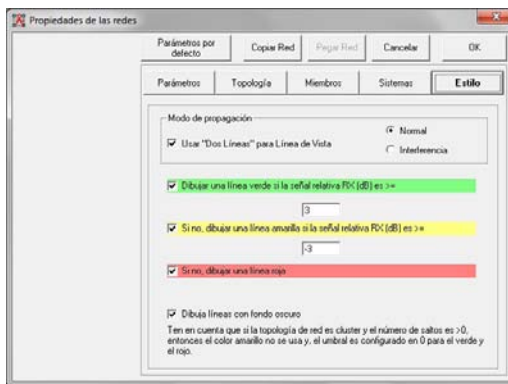


Figura 4.6: Ventana de configuración de estilo.

4.6. Configuración de unidades

En el menú *Archivo* se selecciona la opción *Propiedades de las unidades* y el programa lanza una ventana como la mostrada en la Figura 4.7.

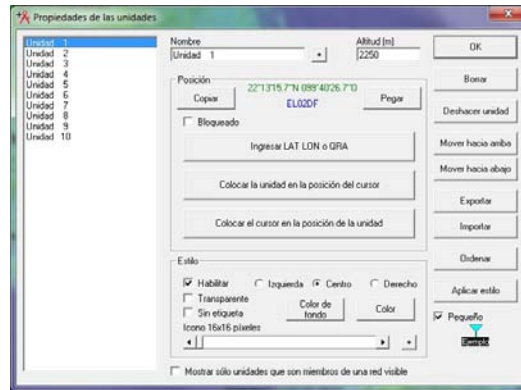


Figura 4.7: Ventana de configuración de unidades.

La columna de la izquierda contiene las unidades de la red con que se trabaja. La fila superior consta de dos casillas, la primera *Nombre* permite almacenar la unidad con el nombre que se quiera dar a esa terminal, la segunda contiene la elevación, *Altitud*, en [msnm] de la terminal para la precisión del mapa cargado, permanece a 0 mientras no se le asignen unas coordenadas.

En la parte de *Posición* se encuentran los datos referentes a la ubicación de la terminal:

- **Ingresar LAT LON o QRA:** Permite cargar las coordenadas de la terminal con la que se va a trabajar. Una vez guardado, que se explicará posteriormente, estas coordenadas se actualizarán en la lectura verde y azul que aparece en la zona justo encima de esta selección.
- **Colocar unidad en la posición del cursor:** Guarda como coordenadas de la terminal la actual posición del cursor.
- **Colocar el cursor en la posición de la unidad:** Sitúa el cursor en las coordenadas almacenadas para esa unidad.
- **Copiar / Pegar:** Primeramente se copia las coordenadas y altitud de la unidad seleccionada en ese momento, para poder transferirla a otra

unidad. No guarda el nombre, ni otras características. Al pegarlo en la nueva unidad, se debe nombrar el nuevo emplazamiento.

- Bloqueado: Permite bloquear las coordenadas introducidas.
- Habilitar / Transparente / Sin etiqueta: Se pueden seleccionar todas, ninguna o alguna de estas opciones simultáneamente. Si Habilitar no se encuentra seleccionada, deshabilita el uso de la unidad, el programa no la tendrá en cuenta. Transparente fuerza el fondo transparente para la etiqueta del nombre de la unidad al mostrarlo en pantalla. Sin etiqueta elimina esta etiqueta.
- Color de fondo / Color: Se puede a su vez elegir el color del fondo de la etiqueta de cada unidad, así como el color para el texto, respectivamente.
- Izquierda / Centro / Derecha: Situación de la etiqueta con el nombre de la terminal respecto del icono, centrado, a la derecha o a la izquierda.
- Icono: Selección del icono que representará la unidad. Existen diferentes tipos predeterminados para diferentes tipos de terminales según diferentes clasificaciones.
- Mostrar solo unidades que son miembros de una red visible: Permite trabajar únicamente con las unidades pertenecientes a redes visibles.

La columna de la derecha permite el manejo de las unidades:

- Mover hacia arriba / Mover hacia abajo: Permite mover las unidades hacia arriba o abajo en su posición en el listado completo.
- Exportar / Importar: Sirve para importar y exportar unidades, entre diferentes redes de trabajo.
- Aplicar estilo: Aplica el estilo configurado en la unidad seleccionada en ese momento al resto de unidades.

4.7. Configuración de mapas

En el menú *Archivo* se selecciona la opción *Propiedades del mapa* y el programa lanza la ventana de configuración de mapas, tal y como se muestra en la Figura 4.8.

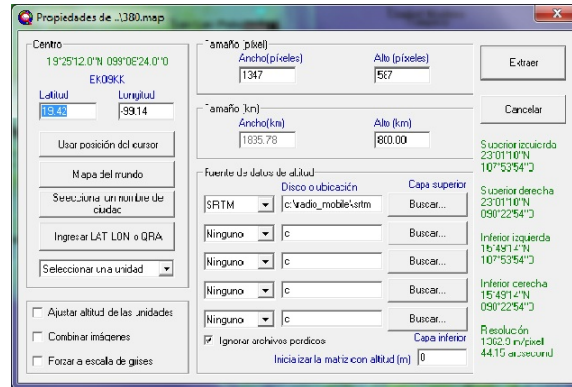


Figura 4.8: Ventana de configuración de mapas en Radio Mobile.

La parte de centro contiene las propiedades necesarias para determinar el centro del mapa con que se quiere trabajar.

Las coordenadas se pueden introducir manualmente rellenando las casillas de latitud y longitud, o a través de las 5 opciones siguientes:

- Usar posición del cursor: Utiliza las coordenadas de la localización actual del cursor.
- Mapa del mundo: Abre un mapa del mundo para seleccionar la posición con el cursor.
- Seleccionar un nombre de ciudad: Permite utilizar una ciudad conocida almacenada en el archivo de ciudades.
- Ingresar LAT LON o QRA: Lanza la ventana de determinación de coordenadas.
- Seleccionar una unidad: Despliega un listado con las unidades cargadas permitiendo que una de las terminales existentes en la red con la que se trabaja sea el centro del mapa.

En la parte de *Tamaño (píxel)* se puede determinar el tamaño del mapa por píxeles, seleccionando el ancho y alto deseados. Así mismo, existe la opción *Tamaño (Km)* donde se puede determinar el tamaño del mapa en [Km], seleccionando el ancho, el alto se ajusta por el programa de forma proporcional. Las coordenadas de las esquinas correspondientes a la selección del tamaño del mapa, aparecerán automáticamente en la columna derecha. Una vez configurados los parámetros, se da clic en *Extraer* y el programa empieza a cargar el mapa.

4.8. Análisis de resultados con Enlace de radio

Una vez configurados los datos necesarios para la simulación del sistema deseado, se debe de tener una ventana donde se muestran la red dentro del mapa cargado. Un ejemplo es mostrado en la Figura 4.9.

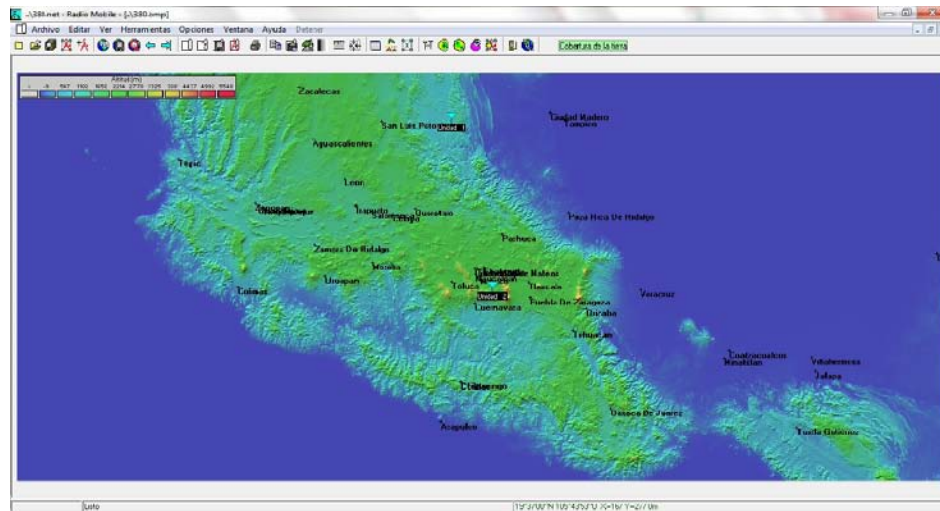


Figura 4.9: Red previamente configurada sobre el mapa cargado.

En el menú *Herramientas* se selecciona la opción *Enlace de radio* o bien en la barra de herramientas con el icono de acceso rápido, se activa una ventana como la mostrada en la Figura 4.10.

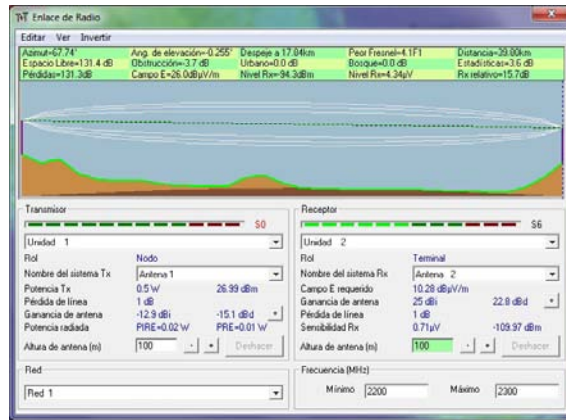


Figura 4.10: Ventana de análisis de Enlace de radio.

Como se puede observar se presentan todos los resultados relativos al enlace. En la fila superior se presentan los resultados radio eléctricos de propagación:

- Azimuth y Elevación con que está orientada la antena transmisora Tx = 101.52° y -0.283° respectivamente.
- Pérdidas por espacio libre = 137.7 [dB]
- Distancia del enlace = 50.87 [Km]
- Peor ángulo de Fresnel para este trayecto = 7.8F1
- En particular y más importante parámetro es *Nivel Rx* [dBm], el cual permite conocer el valor de la potencia recibida en el receptor Rx. Además se muestra el parámetro *Rx relativo* que permite conocer el margen, respecto a la sensibilidad del receptor, con que llega la potencia recibida; éste valor se muestra de color negro cuando hay comunicación y de color rojo cuando (de acuerdo al criterio de -3 [dB]) no hay recepción adecuada. En este caso la potencia recibida es de -86.7 [dBm] con un margen de 14.3 [dB].

En la barra de menú superior:

- Archivo: Permite copiar la imagen o exportar la a un fichero de texto.

- Ver: Permite observar diferentes perspectivas y presentaciones del trayecto del enlace.
- Invertir: Hace que el transmisor Tx ahora sea receptor Rx y el receptor Rx sea ahora el transmisor Tx.

En la figura además se aprecia el perfil orográfico de este enlace. Y debajo se describen los sistemas y topología de cada una de las terminales que se configuraron anteriormente para la red.

Se pueden modificar las alturas de las antenas, así como la frecuencia para comprobar el efecto de la variación de estos parámetros sobre el enlace, y se actualiza automáticamente con los nuevos datos.

Capítulo 5

Análisis de requerimientos de apuntamiento para equipos de comunicaciones directivos

5.1. Introducción

La dirección de apuntamiento del haz principal de la antena en el satélite se define teniendo en cuenta una órbita concreta y suponiendo que el sistema de referencia mecánico (ejes mecánicos) del satélite está alineado con su sistema de referencia ideal (ejes de yaw, roll y pitch). El sistema de referencia ideal coincide con el centro de masa del satélite y emplea los ejes de yaw, roll y pitch[14]. La Figura 5.1 muestra dicho sistema.

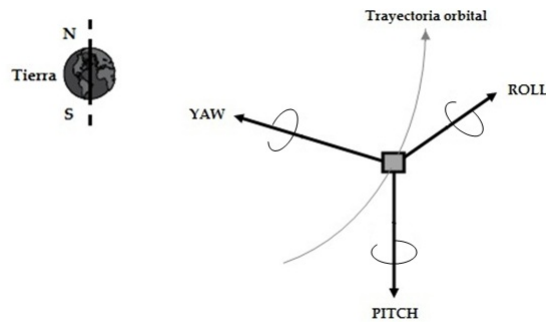


Figura 5.1: Sistema de referencia ideal para un satélite.

El eje yaw apunta al centro de la Tierra, el eje roll apunta en la dirección de avance del satélite (está en el plano de la órbita y es perpendicular eje yaw) y el eje pitch es perpendicular a los dos anteriores.

Una vez que el satélite se encuentra en el espacio, su trayectoria se puede descomponer en dos movimientos:

- Movimiento en la órbita (trayectoria que sigue su centro de masa respecto a un sistema de coordenadas fijado en la Tierra): El desplazamiento del centro de masa del satélite en la órbita da lugar a un cambio en la dirección de apuntamiento, debido a que el satélite no rota por sí mismo para mantener siempre la misma orientación hacia la Tierra. Este efecto es contrarrestado mediante un movimiento de rotación que realiza el subsistema de estabilización (AOCS, Attitude and Orbit Control System). Sin embargo, se debe considerar que la órbita real que sigue el satélite es diferente de la órbita teórica debido a que no se toman en cuenta diversos factores a la hora de realizar los cálculos, lo que contribuye a que la antena sea desviada de la dirección de apuntamiento deseada.
- Movimiento del satélite alrededor de su centro de masa: En el espacio existen diversas perturbaciones que hacen afectan el comportamiento del satélite. Dichas perturbaciones se ven reflejadas como pares de fuerza que actúan en los ejes de referencia reales del satélite, provocando movimiento no deseado del satélite alrededor de su centro de masa. Este desplazamiento produce un error en el apuntamiento del haz de la antena.

Éstas son algunas razones por las cuales es importante el conseguir que el satélite se encuentre estabilizado; es decir, que el sistema de referencia real coincida con el sistema ideal. La estabilización se puede realizar de dos formas: estabilización por giro o estabilización en tres ejes.

En este capítulo se pretende analizar las cuestiones más importantes que son tomadas en cuenta para el apuntamiento de las antenas en el enlace satelital.

5.2. Apuntamiento de antenas en un satélite estabilizado por giro

La técnica de estabilización por giro consiste en brindar al satélite (o a parte de él) de un movimiento de rotación de varias revoluciones por minuto alrededor de uno de sus principales ejes con mayor momento de inercia. Se fija solo uno de los ejes mecánicos con el eje del sistema de referencia ideal (eje pitch). Así, resulta difícil que dicho eje se desvíe de su dirección debido a que el momento angular creado tiende a ser fijo en el espacio (conservación del momento angular). El problema que se presenta es que la antena gira con el satélite y no se consigue el apuntamiento en la dirección deseada. Para poder evitar lo anterior se tienen dos opciones:

- Utilizar una antena omnidireccional en la dirección perpendicular al eje de giro. Ésta solución es fácil, sin embargo es ineficiente debido a la baja directividad que tiene este tipo de antenas. La Figura 5.2 muestra esta opción.

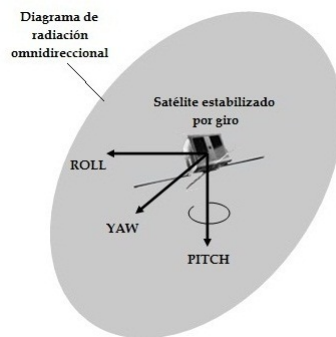


Figura 5.2: Uso de una antena omnidireccional en un satélite estabilizado por giro.

- Utilizar una antena contrarrotatoria. En éste tipo de antenas, el diagrama de radiación rota en sentido contrario al del satélite para contrarrestar su movimiento. Dicha rotación se puede conseguir de dos formas: mecánica (un motor eléctrico se encarga de mover la antena)

o electrónica (la antena es un arreglo de antenas en donde se varía la alimentación que recibe).

5.3. Apuntamiento de antenas en un satélite estabilizado en tres ejes

La técnica de estabilización en tres ejes consiste en la alineación total del sistema de referencia mecánico del satélite con el sistema de referencia ideal (ejes roll, eje pitch y eje yaw); es decir, el satélite siempre está orientado en una dirección determinada. El grado de desestabilización del satélite se mide por los ángulos que forman cada uno de los ejes mecánicos del satélite con sus correspondientes ejes en el sistema de referencia ideal (ángulo roll, ángulo pitch y ángulo yaw); éste movimiento produce un cambio en la dirección de apuntamiento de la antena. La Figura 5.3 muestra ésta opción.

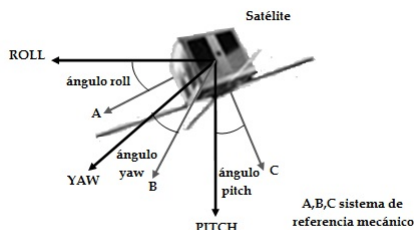


Figura 5.3: Estabilización de un satélite en tres ejes.

Con el sistema de estabilización en tres ejes se puede llegar a conseguir una exactitud de 0.03° para el ángulo roll, 0.02° en el ángulo pitch y 0.3° en el ángulo de yaw; de esta forma, si la antena no posee una ganancia alta es suficiente con el propio subsistema de estabilización (AOCS) para mantener la dirección de apuntamiento. Sin embargo, cuando se requiere gran precisión debido al uso de antenas directivas, es necesaria la utilización de un sistema de apuntamiento de la antena independiente del sistema de referencia del satélite (APS, Antenna Pointing System).

5.4. Planeación del sistema de comunicación satelital

El diseño general de un sistema de comunicación satelital involucra muchos factores complejos para obtener un rendimiento de enlace efectivo. Los principales parámetros que influyen en el diseño del enlace son[22]:

- Frecuencia de operación
- Consideraciones de propagación
- Consideraciones de ruido
- Problemas de interferencia

5.4.1. Frecuencia de operación

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) es la encargada de asegurar la correcta asignación de bandas de frecuencia. Ésta labor la realiza a través de sus cuatro órganos permanentes: Secretaría General, Junta Internacional de Registro de Frecuencias (IFRB), Comité Consultivo Internacional de Radio (CCIR) y el Comité Consultivo Internacional de Telegrafía y Teléfono (CCIT). Las bandas de interés son aquellas por encima de los 100 [MHz] debido a la reflexión ionosférica e incluyen VHF, UHF, L, S, C, X, Ku y Ka. El uso de frecuencias bajas (por debajo de 10 [GHz]) es más económico, sin embargo existe el problema de interferencia debido a los muchos enlaces de redes de microondas terrestres que utilizan esas bandas. En contraste, el uso de frecuencias altas (por arriba de los 10 [GHz]) la atenuación por lluvia y por factores atmosféricos se vuelven de suma importancia.

5.4.2. Consideraciones de propagación

La naturaleza de propagación de ondas electromagnéticas a través de la atmósfera tiene una importancia significativa en el enlace satelital. Podemos dividir los efectos de propagación en pérdidas por espacio libre (FSPL, Free Space-Path Loss) y dos grandes categorías: efectos ionosféricos (significantes especialmente en frecuencias por debajo de 1 [GHz]) y efectos troposféricos (significantes especialmente en frecuencias por encima de 1[GHz]).

5.4.2.1. Pérdidas por espacio libre (FPSL)

Es la pérdida en la fuerza de la señal de una onda electromagnética que resulta debido a la distancia entre terminales en el espacio libre en línea de vista (LOS), es decir, sin ningún obstáculo en la trayectoria de la señal de Tx a Rx que pueda causar reflexión, refracción o interferencia adicional a la señal. Estas pérdidas son las más importantes en el enlace y se pueden calcular como[5]:

$$FSPL = 92.4 + 20\log f + 20\log d \text{ [dB]}$$

donde:

f= frecuencia de operación en [GHz]

d= distancia del satélite a la estación terrena en [Km]

5.4.2.2. Efectos ionosféricos

A pesar de que las ondas por encima de 100 [MHz] pueden pasar la ionósfera pueden ser modificadas por la presencia de electrones libres y el campo magnético de la Tierra. Efectos debidos a la ionización son:

- Rotación de Faraday: Cuando una onda se propaga a través de la ionósfera experimenta una rotación progresiva del plano de polarización, el cual es linealmente proporcional a la componente del campo magnético en la dirección de propagación. El ángulo en que el plano de polarización gira es directamente proporcional al número total de electrones contenido en la región ionizada, como la ionosfera, y es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de operación.
- Centelleo: La existencia de irregularidades a pequeña escala en la concentración de electrones da lugar a fluctuaciones relativamente rápidas en parámetros de la señal (amplitud, fase, polarización), estas fluctuaciones son conocidas como centelleo. Puede causar problemas como el desvanecimiento de la señal recibida, la degradación de la calidad del enlace, entre otros.
- Existen otros efectos de menor importancia que, para efecto de éste capítulo solo serán mencionados: Absorción (aurora y polar-cap), refracción, dispersión y retardo de propagación.

5.4.2.3. Efectos troposféricos

Los efectos troposféricos son importantes en ángulos de elevación pequeños ($\leq 15^\circ$) en las antenas de la estación terrena. Estos efectos son:

- Atenuación debido a lluvia: Después de FSPL, la lluvia es el siguiente factor importante que contribuye a pérdidas de la energía electromagnética debido a que las gotas de lluvia le causan absorción y dispersión. La UIT[8] desarrollo un método general para calcular dicha atenuación, la Figura 5.4 muestra una representación esquemática de los parámetros.

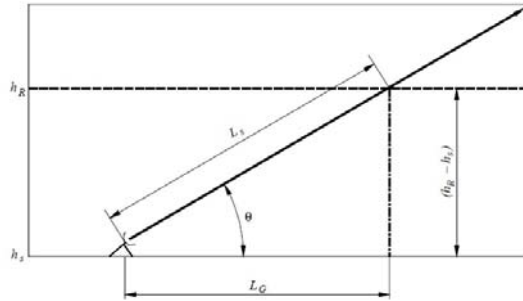


Figura 5.4: Representación esquemática de una trayectoria Tierra-Espacio dando los parámetros que son entrada al proceso de predicción de atenuación.

Paso 1: La altura efectiva de lluvia, h_R , es calculada de la latitud de la estación terrena, ϕ [$^\circ$]:

$$\begin{aligned}
 h_R[\text{Km}] &= 5.0 - 0.075(\phi - 23) \text{ para } \phi > 23^\circ \text{ Hemisferio Norte} \\
 &= 5.0 \quad \text{para } 0^\circ \leq \phi \leq 23^\circ \text{ Hemisferio Norte} \\
 &= 5.0 \quad \text{para } 0^\circ > \phi \geq -21^\circ \text{ Hemisferio Sur} \\
 &= 5.0 + 0.1(\phi + 21) \text{ para } \phi < -21^\circ \text{ Hemisferio Sur}
 \end{aligned}$$

Paso 2: Para un ángulo de elevación $\theta > 5^\circ$ y una altura de la estación terrena sobre el nivel del mar, h_S [Km], la longitud de trayectoria, L_S , debajo de la altura efectiva de lluvia se obtiene como:

$$L_S = \frac{h_R - h_S}{\text{sen}\theta} [\text{Km}]$$

Para $\theta \leq 5^\circ$ se necesita una formula más precisa:

$$L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{(\text{sen}^2\theta + 2(h_R - h_S)/R_e)^{1/2} + \text{sen}\theta} [Km]$$

donde:

$$R_e = \text{radio de la Tierra} = 6378 [Km]$$

Paso 3: Proyección horizontal, L_G , de la longitud de trayectoria es encontrada como:

$$L_G = L_S \cos\theta [Km]$$

Paso 4: Obtener la intensidad de lluvia, $R_{0.01}$ [mm/h], excedida para 0.01% (con un tiempo de integración de un minuto) de un año promedio. Éste valor puede ser obtenido de mapas de zonas climáticas de lluvia junto con tablas que proporciona la UIT[9]. La Figura 5.5 muestra el mapa para el continente americano y la Tabla 5.1 muestra sus respectivos valores.

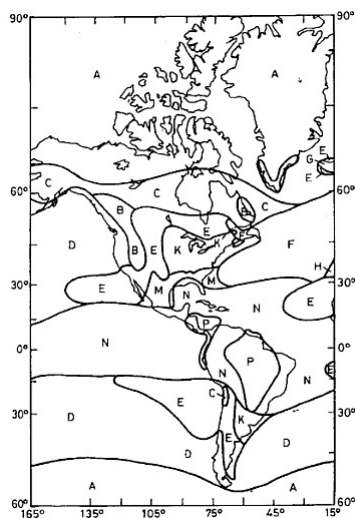


Figura 5.5: Zonas climáticas de lluvia (15° Oeste - 165° Oeste).

Paso 5: Factor de reducción, $r_{0.01}$, para el 0.01% del tiempo (99.99% disponibilidad del enlace) se puede calcular como:

$$r_{0.01} = \frac{1}{(1 + L_G/L_0)}$$

% del tiempo	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
1.000	-	0.5	0.7	2.1	0.6	1.7	3	2	8	1.5	2	4	5	12	24
0.300	0.8	2	2.8	4.5	2.4	4.5	7	4	13	4.2	7	11	15	34	49
0.100	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
0.030	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105	96
0.01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0.003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200	142
0.001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250	170

Tabla 5.1: Intensidad de lluvia excedida [mm/h] para ciertos porcentajes de tiempo.

donde:

$$L_0 = 35 \exp(-0.015R_{0.01}) \text{ para } R_{0.01} \leq 100 [mm/h];$$

$$\text{si } R_{0.01} > 100 [mm/h] \text{ entonces } L_0 = 35 \exp[-0.015(100)]$$

Paso 6: Obtener la atenuación específica, γ_R , usando $R_{0.01}$ y los coeficientes dependientes de la frecuencia que son proporcionados por la UIT[10]. Estos coeficientes son presentados en la Tabla 5.2

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha [dB/Km]$$

donde:

Los valores de k y α , para polarización circular o lineal, pueden ser calculados con los valores del Cuadro 5.2 utilizando las siguientes ecuaciones:

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta\cos 2\tau]/2$$

$$\alpha = [k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta\cos 2\tau]/2k$$

donde:

τ es el ángulo de inclinación de polarización relativo (para polarizaciones circulares $\tau=45^\circ$)

Es importante mencionar que para otras frecuencias se pueden obtener los valores interpolando los coeficientes de la tabla.

Frecuencia [GHz]	k_H	k_V	α_H	α_V
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
2	0.0001540	0.0001380	0.963	0.923
4	0.0006500	0.0005910	1.121	1.075
6	0.0017500	0.0015500	1.308	1.265
7	0.0030100	0.0026500	1.332	1.312
8	0.0045400	0.0039500	1.327	1.310
10	0.0101000	0.0088700	1.276	1.264
12	0.0188000	0.0168000	1.217	1.200
15	0.0367000	0.0335000	1.154	1.128
20	0.0751000	0.0691000	1.099	1.065
25	0.1240000	0.1130000	1.061	1.030
30	0.1870000	0.1670000	1.021	1.000
35	0.2630000	0.2330000	0.979	0.963
40	0.3500000	0.3100000	0.939	0.929
45	0.44200000	0.39300000	0.903	0.897
50	0.5360000	0.47900000	0.873	0.868

Tabla 5.2: Coeficientes de regresión para estimar la atenuación específica.

Paso 7: La atenuación total por lluvia, L_R , para 0.01% de un año es:

$$L_{R_{0.01}} = \gamma_R L_{SR_{0.01}} [dB]$$

- Absorción atmosférica: Cuando las frecuencias de operación son lo suficientemente altas, las ondas electromagnéticas interactúan con las moléculas de los gases en la atmósfera. Estas interacciones reducen la potencia de la señal conforme atraviesa la atmósfera y se intensifican en las frecuencias de resonancia del vapor de agua (H₂O), oxígeno (O₂) y bióxido de carbono (CO₂). Para enlaces satelitales es importante tomar en cuenta el vapor de agua (22 [GHz]) y el oxígeno (60 [GHz]), por lo que la UIT asigna bandas para uso satelital por debajo de los 30 [GHz] para evitar las zonas de mayor atenuación. La Figura 5.6 muestra valores típicos de la atenuación por absorción atmosférica, es

importante mencionar que para ángulos de elevación pequeños ($\leq 10^\circ$) las pérdidas son más significantes[11, 33].

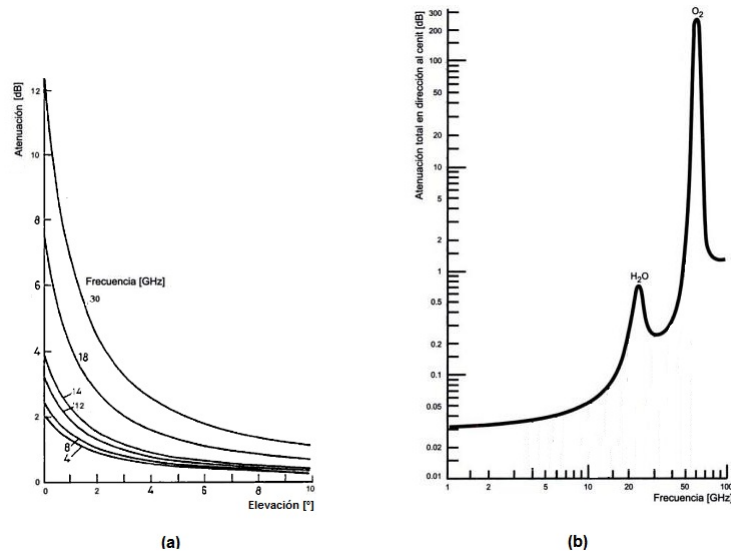


Figura 5.6: Atenuación debida a la absorción atmosférica para condiciones climáticas normales (temperatura de 20° y densidad de vapor de agua de $7.5 \text{ [g/cm}^3\text{]}$). La Figura (a) muestra una mayor atenuación para ángulos de elevación pequeños, mientras que la Figura (b) muestra que para frecuencias altas se produce demasiada atenuación.

La Figura 5.6 (b) muestra una atenuación de acuerdo al cenit¹; de modo que si el ángulo de elevación es otro se tiene que corregir la estimación de dicha absorción atmosférica mediante la siguiente fórmula:

$$L_A = L_C \operatorname{cosec} \theta \text{ [dB]}$$

donde:

θ = ángulo de elevación, $0^\circ < \theta < 90^\circ$

L_C = atenuación hacia el cenit, obtenida en la lectura de la Figura 5.6 (b)

L_A = atenuación por absorción atmosférica para el ángulo de elevación dado

¹ Trayectoria directamente hacia arriba y siguiendo el camino más corto posible.

- Atenuación debida al sitio, L_{sit} : Se debe de tomar en cuenta las pérdidas que ocasiona el ambiente local en donde se encuentra la estación terrena (edificios, árboles, orografía, etc.). Para efectos de ésta tesis, estos efectos serán representados a través del modelo ITS del software RadioMobile.
- Existen otros efectos de menor importancia que, para efecto de éste capítulo solo serán mencionados: Desvanecimiento debido a refracción y multitrayectoria, despolarización (relacionada a la atenuación por lluvia).

5.4.3. Consideraciones de ruido

Tanto en los sistemas de comunicación satelital analógico como en el digital, la calidad de la señal recibida en la estación terrena es sumamente dependiente a la relación señal a ruido del enlace. Si la señal recibida es lo suficientemente débil en comparación con el nivel de ruido, puede llegar a ser imposible detectar dicha señal.

Las fuentes de ruido incluyen fuentes producidas por el hombre y fuentes naturales. Las primeras incluyen el ruido generado en la estación terrena y en el equipo satelital, y son casi insignificantes a frecuencias mayores a 1 [GHz]. Las segundas incluyen ruido cósmico (debido a ondas electromagnéticas emitidas por las estrellas, es despreciable en frecuencias mayores a 1 [GHz]), ruido atmosférico (debido a absorción de oxígeno, vapor de agua e hidrometeoros, es despreciable en frecuencias satelitales), ruido solar y del cielo (temperatura de ruido de la antena).

5.4.3.1. Temperatura de ruido de la antena

La temperatura de ruido de la antena es la medida del ruido entrante al receptor mediante la antena; dicha temperatura se puede calcular tomando en cuenta todas las contribuciones de todos los cuerpos radiantes alrededor de la misma.

Existen dos posibilidades que se deben de tomar en cuenta por separado[22]:

- Antena del satélite (para el enlace ascendente): Las principales fuentes de ruido son la Tierra y el espacio exterior. La temperatura de ruido de la antena depende de la frecuencia de operación y de la posición orbital.

- Antena de la estación terrena (para el enlace descendente): Las principales fuentes de ruido son el Sol, la Tierra, el cielo y la lluvia. La Figura 5.7 muestra las contribuciones de temperatura de ruido de la antena en la estación terrena.

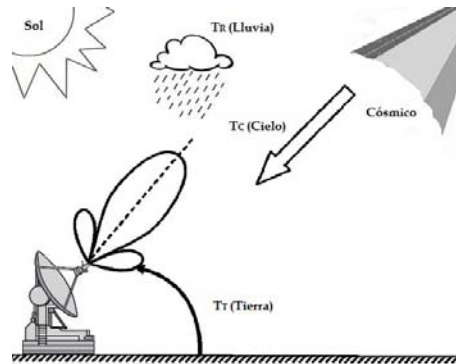


Figura 5.7: Contribuyentes de la temperatura de ruido de la antena en la estación terrena.

La participación del Sol es normalmente despreciada debido a que solo actúa en la señal por tiempos cortos (<10 [min]) sobre 8 días al año. En cuanto a la temperatura de ruido de la Tierra, T_T , por lo general y como primera aproximación (de acuerdo al ángulo de elevación, θ ,) se puede tomar como[33]:

$$\begin{aligned} T_T &= 50 [K] & \text{si } 0^\circ < \theta \leq 10^\circ \\ T_T &= 10 [K] & \text{si } 10^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{aligned}$$

La temperatura de ruido del cielo, T_C , normalmente es una combinación del ruido cósmico, el ruido galáctico y el ruido troposférico, y suele tomarse en cuenta en condiciones de cielo despejado (sin lluvia). Éste ruido es mayor para ángulos de elevación pequeños, y sus valores son mostrados en la Figura 5.8.

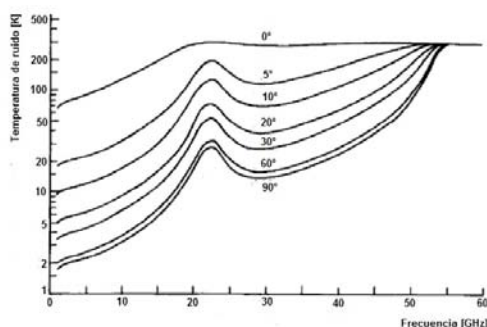


Figura 5.8: Temperatura de ruido del cielo, para condiciones de cielo despejado.

Por otro lado, la temperatura de ruido de la lluvia esta en función de las pérdidas que produce en el enlace, L_R [dB], y se puede calcular como:

$$T_R = 280 \left(1 - \frac{1}{L_R} \right) [K]$$

Finalmente, la temperatura de ruido de la antena se puede calcular como:

$$T_a = T_T + T_C + T_R [K]$$

5.4.3.2. Temperatura de ruido total del sistema receptor

La temperatura total del sistema receptor es un arreglo en cascada como el que se muestra en la Figura 5.9.

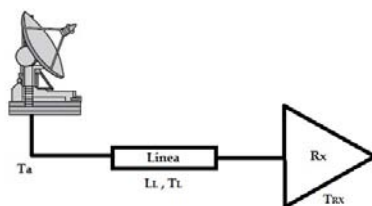


Figura 5.9: Componentes para la temperatura de ruido total del sistema.

De tal forma que la temperatura de ruido del sistema, T_{sis} , se calcula como[23]:

$$T_{sis} = T_a + T_L + T_{RX} = \frac{T_a}{L_L} + \left(1 - \frac{1}{L_L}\right) T_0 + T_{RX} \text{ [K]}$$

donde:

L_L = Pérdidas de la línea que conecta a la antena al receptor [dB]

T_0 = Temperatura ambiente, 290 [K]

T_{RX} = Temperatura de ruido del receptor [K]

5.4.4. Problemas de interferencia

Las principales fuentes de interferencia incluyen la interferencia entre enlaces satelitales y enlaces de microondas terrestres que comparten la misma banda de frecuencia de operación, la interferencia entre dos satélites compartiendo la misma banda de frecuencia, la interferencia entre dos estaciones terrenas operando en la misma banda de frecuencia que acceden a diferentes satélites, las interferencias derivadas por polarización cruzada en frecuencia de reuso, la interferencia de canales adyacentes y las interferencias debidas a los fenómenos de intermodulación.

La interferencia entre enlaces satelitales y de microondas terrestres pueden ser de dos tipos: uno donde la transmisión de un enlace terrestre interfiere con la recepción de una estación terrena y el otro donde la transmisión de una estación terrestre interfiere con la recepción de un enlace terrestre. El nivel de interferencia intersatélite y la interferencia entre estaciones terrenas se rige principalmente por factores como la precisión de apuntamiento de las antenas, el ancho de haz de transmisión y recepción, el espaciamiento entre satélites en la órbita (co-ubicación), etc. Es importante mencionar que la UIT, a través del sector de Radiocomunicaciones, posee recomendaciones para evitar estos tipos de interferencia. La interferencia por polarización cruzada es causada por el acoplamiento de la energía de un estado de polarización a otro cuando un sistema de reutilización de frecuencia emplea polarización lineal ortogonal (horizontal y vertical) o polarización ortogonal circular (izquierda y derecha); este acoplamiento de la energía se produce debido a un valor finito de discriminación por polarización cruzada de estaciones terrenas y antenas de satélite, así como a la despolarización causada por la lluvia. La interferencia entre canales adyacentes surge del traslape en amplitud de los filtros de canal. La interferencia de intermodulación es causada por los productos de intermodulación que se realizan en el satélite

al tener múltiples portadoras que se amplifican en el HPA, que tiene una propiedad no lineal tanto en amplitud como en fase.

5.5. Cálculo de los ángulos de elevación y azimut

Como se explicó anteriormente en el capítulo 1, estos ángulos son importantes para la correcta operación de la estación terrena y el correcto apuntamiento de la antena hacia el satélite. Ambos ángulos están en función de las coordenadas geográficas del satélite y de la estación terrena. El ángulo de elevación, θ [°], se calcula como[15]:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\cos\beta - \sigma}{\text{sen}\beta} \right)$$

donde:

$$\beta = \text{sen}(\text{latitud}_{sat}) \text{sen}(\text{latitud}_{est}) + \cos(\text{latitud}_{sat}) \cos(\text{latitud}_{est}) \cos(\Delta L)$$

$$\Delta L = \text{longitud}_{sat} - \text{longitud}_{est}$$

$$\sigma = \frac{r}{r + h}$$

r= radio de la Tierra=6378 [Km]

h=altura del satélite sobre el ecuador [Km]

Para ángulo de azimut se utiliza un ángulo auxiliar, Φ' [°], que se calcula como:

$$\Phi' = \tan^{-1} \left(\frac{\text{sen}(\Delta L)}{\cos(\text{latitud}_{est}) \tan(\text{latitud}_{sat}) - \text{sen}(\text{latitud}_{est}) \cos(\Delta L)} \right)$$

De tal forma que el ángulo de azimut, Φ [°], es:

$$\begin{aligned} \Phi &= 180^\circ - \Phi' && \text{Si la estación terrestre esta al noroeste del satélite} \\ &= 180^\circ + \Phi' && \text{Si la estación terrestre esta al noreste del satélite} \\ &= \Phi' && \text{Si la estación terrestre esta al suroeste del satélite} \\ &= 360^\circ - \Phi' && \text{Si la estación terrestre esta al sureste del satélite} \end{aligned}$$

5.6. Cálculo del enlace descendente

Todas las consideraciones anteriores se ven reflejadas en los enlaces satelitales. El modelado de los enlaces puede ser tan complejo como uno desee debido a los diversos y cambiantes parámetros requeridos. Para efectos de esta tesis, el modelo general del enlace se describe como [11, 27, 23]:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{des} [dB] = PIRE_{sat} [dBW] - \text{Pérdidas de propagación} [dB] + \\ + G_{est} [dB] - N_{0est} [dBW]$$

donde:

- $\left(\frac{C}{N_0}\right)_{des}$ = Relación portadora a ruido en el receptor (estación terrena)
- $PIRE_{sat}$ = PIRE correspondiente al transmisor (satélite)
- Pérdidas de propagación* = La suma de los factores que afectan la transmisión
- G_{est} = Ganancia de la antena receptora (estación terrena)
- N_{0est} = Potencia de ruido del receptor (estación terrena)

Cuando la antena de la estación terrena sufre desapuntamiento, el término de la ganancia se ve afectada por el ángulo de desviación, α , de la antena con respecto al eje de apuntamiento. De tal forma que la nueva ganancia sera:

$$G_{est} [dB] = G_{max} [dB] - 12 \left(\frac{\alpha}{\theta_{-3dB}} \right)^2$$

Al sustituir términos nos queda:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{des} [dB] = PIRE_{sat} [dBW] - FSPL [dB] - L_R [dB] - L_A [dB] - \\ - L_{sit} [dB] + G_{est} [dB] - 10 \log(kT_{sis}) [dBW]$$

Al reagrupar términos tenemos:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{des} [dB] = PIRE_{sat} [dBW] - FSPL [dB] - L_{sit} [dB] + G_{est} [dB] - \\ - L_R [dB] - L_A [dB] - 10 \log(kT_{sis}) [dBW]$$

Los primeros cuatro términos del lado derecho de la ecuación son calculados por el software RadioMobile (incluyendo las pérdidas en la línea y las pérdidas por desapuntamiento de la antena en la estación receptora, que son reflejadas en su ganancia). Los últimos tres términos del lado derecho de la ecuación se calculan separadamente y se integran al cálculo para obtener la relación portadora a ruido que servirá para realizar gráficas y comparaciones en el siguiente capítulo.

Capítulo 6

Requerimientos de apuntamiento satelital en órbita baja para equipos de comunicaciones

6.1. Introducción

Actualmente la simulación es una herramienta importante para el desarrollo y predicción del comportamiento que tendrá un sistema. Los simuladores permiten acercarse a la vida real al lograr experimentar con diferentes parámetros de entrada y obtener resultados, en primeras aproximaciones, que ayudan a la implementación de proyectos.

En el presente capítulo se pretende recapitular toda la información anteriormente descrita, al realizar distintas simulaciones que sean capaces de brindar una idea (en una primera aproximación) del comportamiento del sistema de comunicaciones en banda S. Se modificarán diferentes parámetros de entrada para observar la dependencia que se tiene en el resultado, así mismo los resultados serán representados en forma gráfica para su mejor interpretación.

6.2. Resumen del enlace descendente

La Tabla 6.1 muestra el resumen del enlace descendente que se calculará. Estos valores serán introducidos al software Radio Mobile (los parámetros restantes al modelo de propagación ITS serán los parámetros por defecto).

Parámetro	Valor	Unidad
Frecuencia	2.25	GHz
Satélite		
Potencia de Transmisión	0.5	W
Ganancia (Antena de parche)	7	dBi
θ_{-3dB}	60	°
Pérdidas de la línea	1	dB
Estación terrena		
Sensibilidad de Recepción	-110	dBm
Ganancia (Reflector parabólico)	25	dBi
θ_{-3dB}	6	°
Pérdidas de la línea	1	dB
Figura de ruido del receptor	2	dB
Modulación	BPSK/QPSK	-
Ubicación (Ciudad de México)	Latitud: 19°19' N Longitud: 99°39' O	-
Altitud de la antena	2250	msnm

Tabla 6.1: Resumen del enlace descendente.

Con los parámetros ingresados a Radio Mobile y los parámetros por defecto al modelo ITS, se realizaron las simulaciones. Se mantuvieron ambas antenas en LOS y en línea horizontal (misma altura y ángulo de elevación en la estación terrena igual a 0°) para no introducir las pérdidas producidas por ángulos de elevación, puesto que serán introducidas posteriormente en los cálculos; se mantuvo fija la antena transmisora y se realizó un barrido del azimut en la antena receptora, para diferentes distancias de enlace, obteniendo

así la potencia en recepción. A ésta potencia es necesaria restarle las pérdidas adicionales por lluvia y absorción atmosférica, así como compararla con el ruido que se presenta en un enlace satelital. Para ello es necesario calcular algunos parámetros adicionales, que fueron descritos en capítulos anteriores.

6.3. Parámetros adicionales

Para un ángulo de elevación, $\theta = 5^\circ$, los parámetros adicionales calculados se muestran en la Tabla 6.2.

Parámetro	Valor	Unidad
Atenuación por lluvia, L_R	0.13	dB
Atenuación por absorción atmosférica, L_A	0.36	dB
Temperatura de ruido de la antena, T_a	78.26	K
Temperatura de ruido del sistema, T_{sis}	291.42	K

Tabla 6.2: Parámetros adicionales calculados para $\theta = 5^\circ$.

Para diferentes ángulos de elevación, los parámetros adicionales calculados se muestran en la Tabla 6.3.

Parámetro	Valor $\theta = 10^\circ$	Valor $\theta = 15^\circ$	Valor $\theta = 20^\circ$
L_R [dB]	0.11	0.095	0.084
L_A [dB]	0.18	0.12	0.093
T_a [K]	53.22	21.56	20.86
T_{sis} [K]	282.48	248.16	245.83

Tabla 6.3: Parámetros adicionales calculados para diferentes ángulos de elevación.

Se hace distinción del ángulo de elevación en la antena de la estación terrena debido a que este parámetro es importante para la obtención de las pérdidas adicionales (lluvia y absorción atmosférica). Si el ángulo de elevación es pequeño entonces la antena es más susceptible a recibir el ruido provocado por la superficie terrestre, así como las reflexiones múltiples de diferentes señales. Por otro lado, si el ángulo de elevación es grande, entonces los efectos

mencionados se reducen. Para ángulos de elevación mayores a 20° las pérdidas producidas no tienen mucha variación.

Una vez obtenidos estos parámetros, se especifica un cierto ángulo de elevación y una cierta distancia de enlace, entonces para cada resultado de las simulaciones se agregan los parámetros adicionales al ángulo de elevación respectivo (de acuerdo a la sección 5.6) y de esta manera se obtiene la relación portadora a ruido.

Una vez obtenidas las diferentes relaciones portadora a ruido por cada combinación de ángulo de elevación y distancia de enlace, se utilizan las relaciones descritas en la sección 1.5.5 para obtener la relación energía de bit a ruido y posteriormente el BER. Es importante mencionar que para cada distancia de enlace se realizaron 40 mediciones (40 simulaciones), cada medición era el resultado de mover 1° (escala mínima del software) el ángulo de azimut en la estación receptora, la mitad de las mediciones corresponden al movimiento de la antena hacia la derecha y la otra mitad corresponden al movimiento de la antena hacia la izquierda.

6.4. Gráficas

Los resultados obtenidos fueron tabulados de acuerdo a las diferentes combinaciones de distancia de enlace (380 [Km], 400 [Km], 500 [Km], 600 [Km], 700 [Km] y 800[Km]) y ángulos de elevación (5°, 10°, 15°, 20°). A continuación se presentan los resultados de forma gráfica, donde las gráficas fueron realizadas en Matlab y muestran el BER obtenido en función del ángulo off Boresight¹ para una tasa de transmisión de 1 [Mbps]. Las Figuras 6.1 a 6.6 muestran las gráficas de los resultados obtenidos.

¹Ángulo que se forma entre el eje al que debe de apuntar la antena y el eje actual al que apunta la antena. Los grados positivos significan que la antena se mueve hacia la derecha del objetivo, y los grados negativos indican un movimiento hacia la izquierda del objetivo.

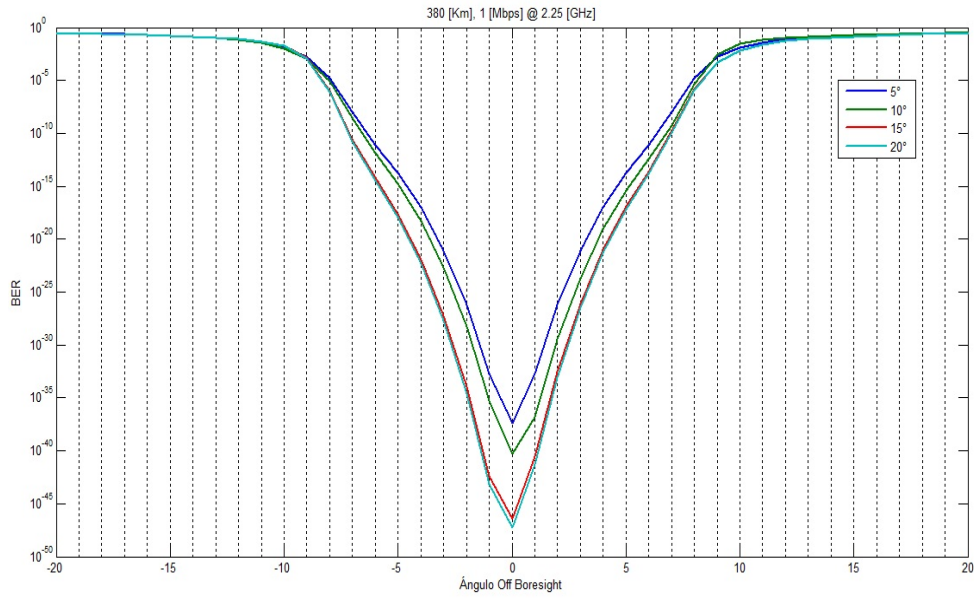


Figura 6.1: BER para un enlace a 380 [Km] con tasa de transmisión constante.

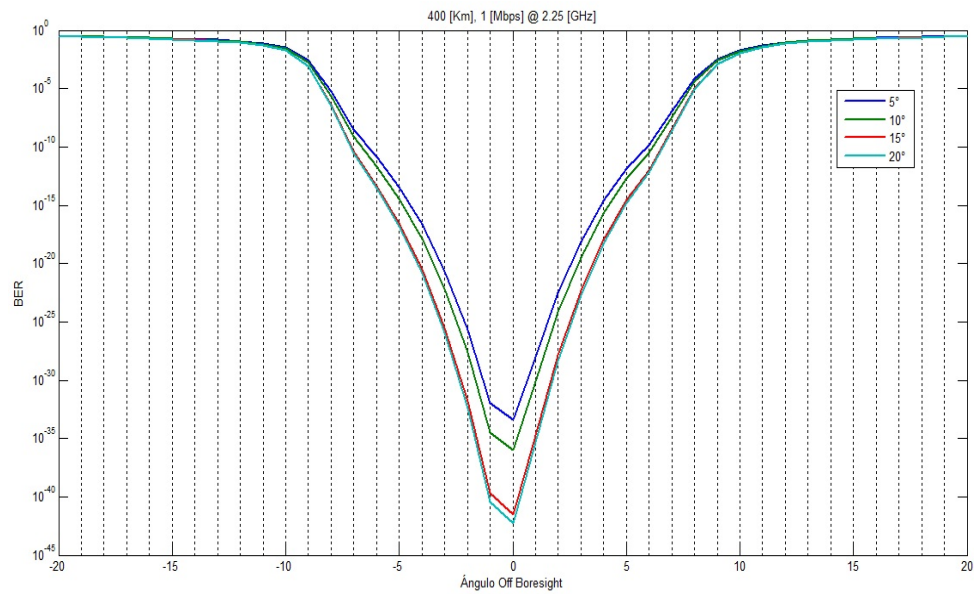


Figura 6.2: BER para un enlace a 400 [Km] con tasa de transmisión constante.

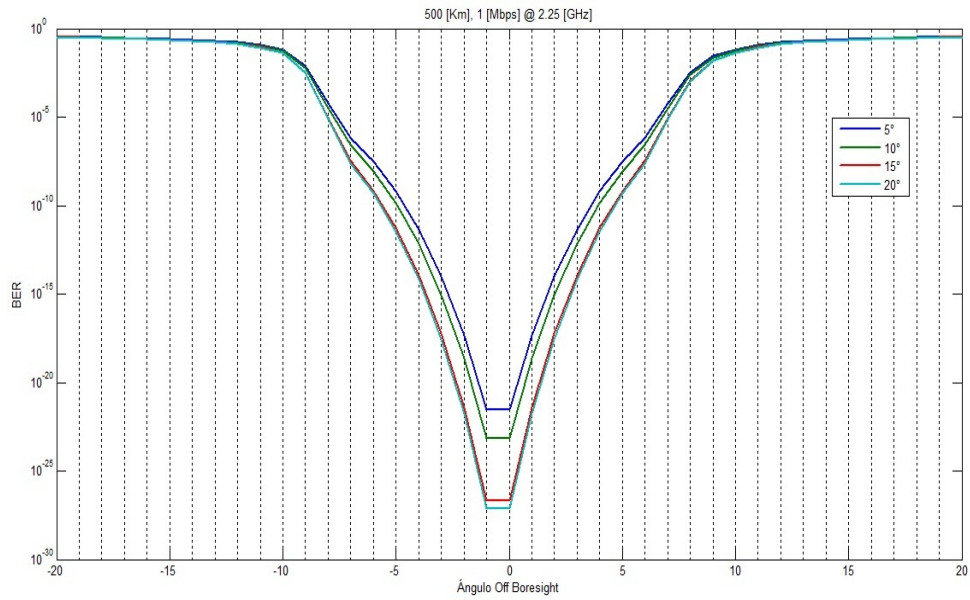


Figura 6.3: BER para un enlace a 500 [Km] con tasa de transmisión constante.

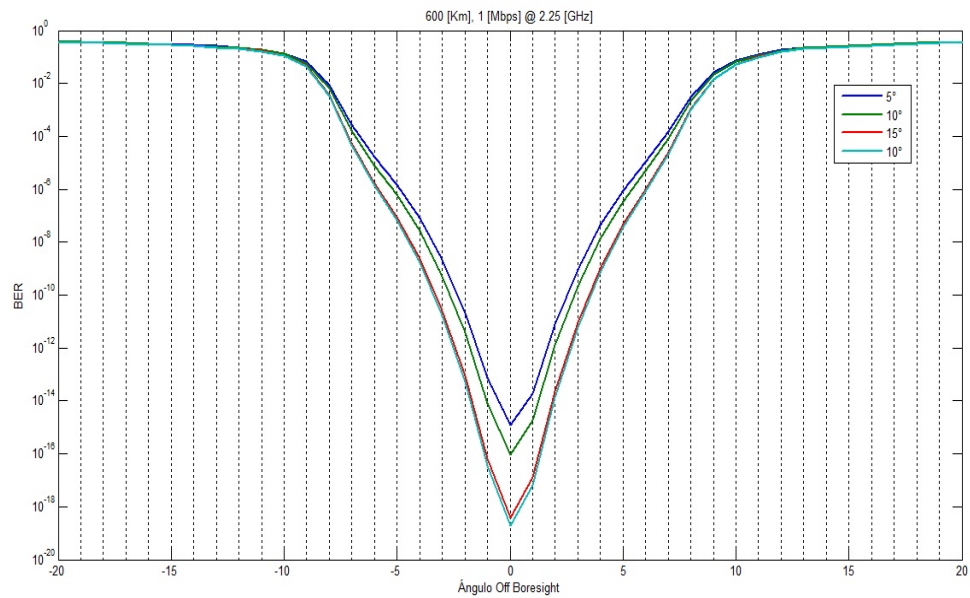


Figura 6.4: BER para un enlace a 600 [Km] con tasa de transmisión constante.

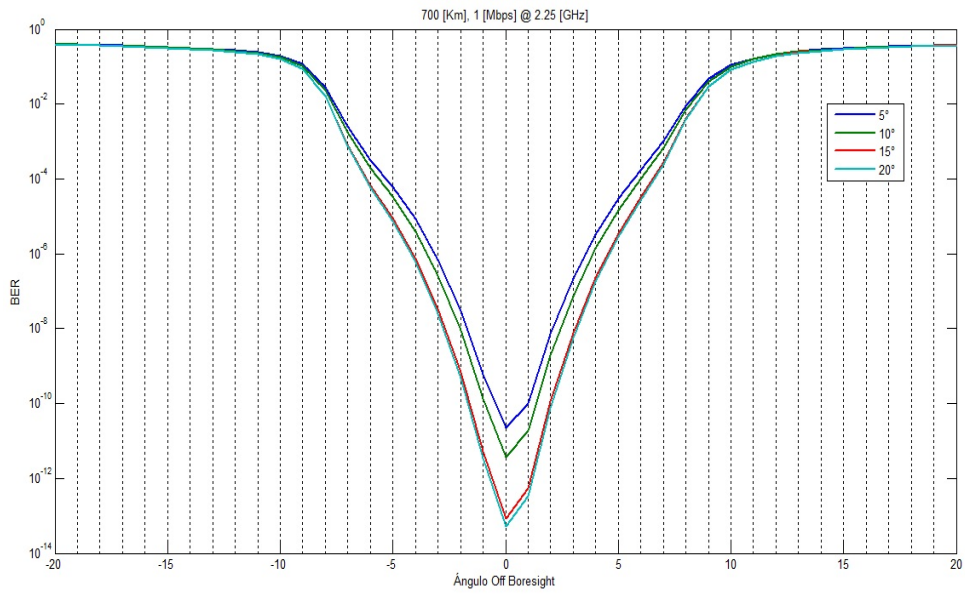


Figura 6.5: BER para un enlace a 700 [Km] con tasa de transmisión constante.

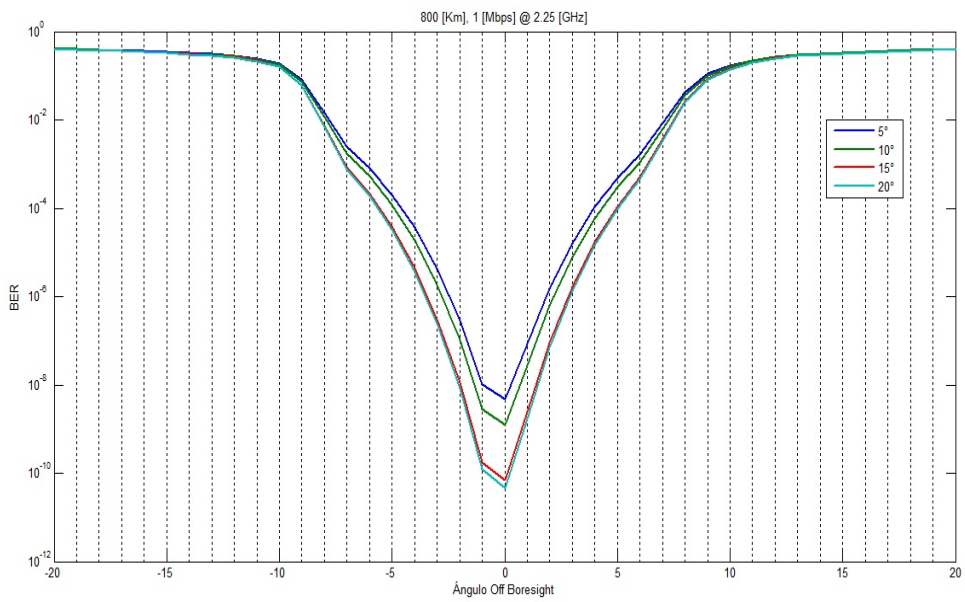


Figura 6.6: BER para un enlace a 800 [Km] con tasa de transmisión constante.

Para una mejor idea del comportamiento del enlace, la Figura 6.7 muestra una comparación de las gráficas anteriormente obtenidas para las diferentes distancias de enlace con una tasa de transmisión de 1 [Mbps] y a un ángulo de elevación fijo de 5°. Se eligió éste ángulo debido a que es el peor de los casos.

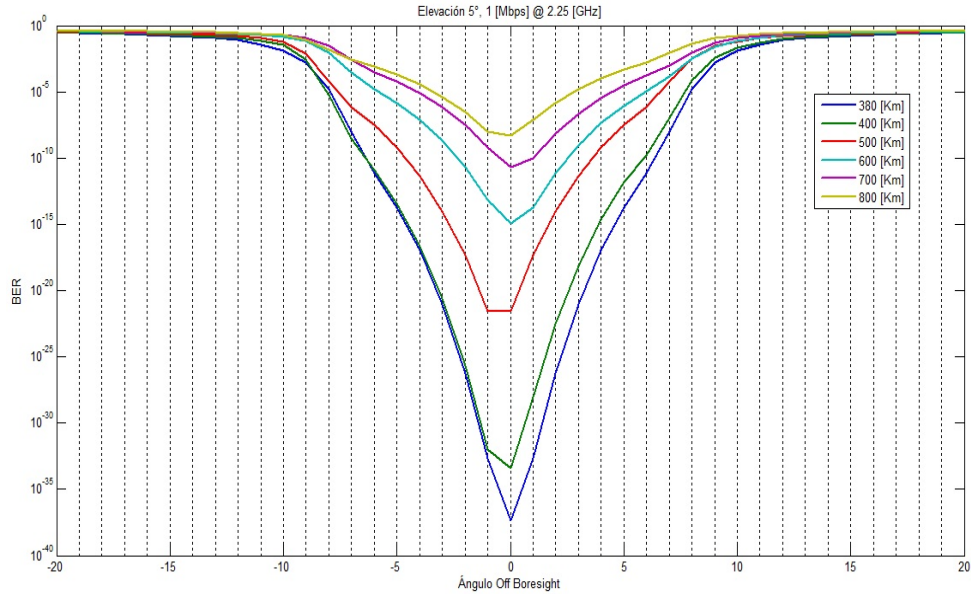


Figura 6.7: Comparación del comportamiento del enlace a una tasa y ángulo de elevación fijos.

De las figuras anteriores, además de la variable independiente (ángulo de apuntamiento) y la distancia del enlace satelital, también se pueden cambiar los parámetros de tasa de transmisión y frecuencia de operación. La frecuencia no será manipulada puesto que el objetivo de ésta tesis es centrarse en la banda S, por lo que ahora se modificará la tasa de transmisión para observar el comportamiento descrito. La Figura 6.8 muestra el comportamiento del enlace con respecto al cambio en la tasa de transmisión. Para diferentes tasas se utilizó el mismo ángulo de elevación, 5°, y la distancia más larga, es decir, una distancia de 800 [Km] (ésta combinación resulta para el peor de los casos).

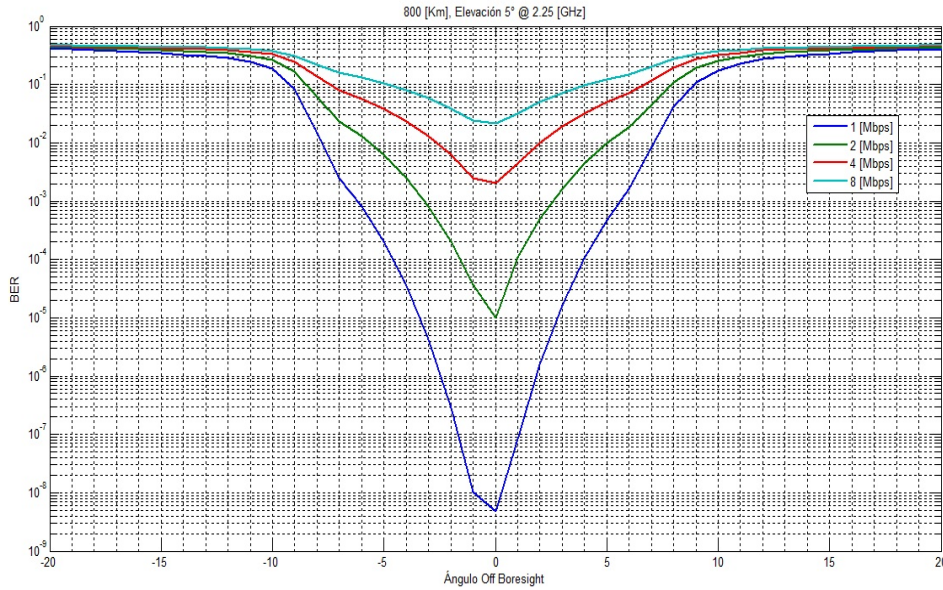


Figura 6.8: Comparación del enlace a una distancia y ángulo de elevación fijos.

6.5. Resultados

Los parámetros establecidos para transmisión y recepción (Tabla 6.1) permiten obtener un buen enlace satelital. Es importante mencionar que éstos parámetros se pueden modificar, el sólo hecho de modificar un solo parámetro brindará nuevos resultados. Los parámetros que son más fácilmente manipulables son la distancia del enlace, el ángulo de elevación, la frecuencia y la tasa de transmisión.

Analizando las gráficas se puede observar que conforme aumenta la distancia del enlace, las pérdidas también aumentan y la relación señal a ruido disminuye, por ende la relación energía de bit a ruido también disminuye y el BER aumenta. De manera análoga, se observa el mismo comportamiento para la tasa de transmisión.

Para ángulos de elevación pequeños las pérdidas aumentan y por lo tanto también el BER. Es importante mencionar que se considera aceptable tener un BER de 10^{-5} , sin embargo el BER típico es de 10^{-6} [30]. En base a lo anterior y a los características establecidas para el enlace, se puede observar

que:

- Para una distancia de 380 [Km] y 400 [Km] las simulaciones muestran que existe un margen de error aproximado de $\pm 7,5^\circ$.
- Para una distancia de 500 [Km] en las simulaciones se observa una característica importante, si el ángulo de elevación es pequeño (entre 5° y 10°) existe un margen de error aproximado de $\pm 6^\circ$, pero si el ángulo de elevación es mayor entonces existe un margen de error aproximado de $\pm 7^\circ$. Aquí se puede observar que el no elegir correctamente el ángulo de elevación puede repercutir en tener un rango menor de apuntamiento y por ende una mayor probabilidad de error.
- Para una distancia de 600 [Km] se observa el mismo comportamiento, si el ángulo de elevación es pequeño (entre 5° y 10°) las simulaciones muestran un margen de error aproximado de $\pm 5^\circ$, pero si el ángulo de elevación es mayor entonces muestran un margen de error aproximado de $\pm 6^\circ$.
- Para una distancia de 700 [Km] se observan que el patrón de la gráfica se estrecha, ahora se tiene que si el ángulo de elevación es pequeño (entre 5° y 10°) las simulaciones muestran un margen de error aproximado de $\pm 3,5^\circ$, pero si el ángulo de elevación es mayor entonces muestran un margen de error aproximado de $\pm 4,5^\circ$.
- Para una distancia de 800 [Km] se observan que el patrón de la gráfica se estrecha, ahora se tiene que si el ángulo de elevación es pequeño (entre 5° y 10°) las simulaciones muestran un margen de error aproximado de $\pm 2^\circ$, pero si el ángulo de elevación es mayor entonces muestran un margen de error aproximado de $\pm 3^\circ$.

La tendencia mostrada significa que el aumento de distancia en el enlace requiere de una mayor precisión de apuntamiento, y que de acuerdo a él se puede obtener una mayor o menor probabilidad de error de transmisión.

Cuando se sobrepasa el margen de error aproximado de las simulaciones, se observó que por cada grado de error en el apuntamiento de la antena se tiene una pérdida de alrededor de 1 [dB], lo que hace que la pendiente de las gráficas sea cada vez mayor y que el más mínimo cambio en la dirección de apuntamiento produce un gran cambio en la probabilidad de error.

Por otra parte, el aumento de la tasa de transmisión produce un considerable aumento en el BER y por lo tanto se reduce de manera drástica el margen de error disponible. Para una distancia de 800 [Km] y una tasa de transmisión de 2 [Mbps], las simulaciones muestran que el margen de error aproximado se reduce $\pm 0,3^\circ$; para tasas de transmisión mayores, y bajo los mismos parámetros, se necesita aumentar la potencia de transmisión debido a que el BER calculado es muy alto para obtener un buen enlace satelital, sin embargo el aumento de la potencia en el espacio significa un mayor costo económico.

Para tasas de transmisión altas y distancias grandes se requieren de mayores exactitudes, se manejan errores de apuntamiento de fracciones de grado, alrededor de 0.1° o mayores[30]. Existen equipos que manejan estas precisiones pero un problema importante es el costo de los mismos.

Otra opción es aumentar la ganancia de las antenas. La antena del satélite esta restringida en cuanto a tamaño, por lo que la única opción para aumentar su ganancia es aumentar la frecuencia, sin embargo el aumento de frecuencia (en satélites pequeños) hasta el momento solo llega a banda S. La antena en la estación terrena puede aumentar su ganancia aumentando su tamaño o aumentando la frecuencia, la primera opción no es viable ya que al aumentar el tamaño entonces la frecuencia disminuye y se tendrá menor capacidad de transferencia de información, la segunda opción es complicada puesto que la antena del satélite aun no puede operar en frecuencias mayores.

Capítulo 7

Propuesta de sistema de comunicaciones en banda S para el satélite HumSAT-México

7.1. Introducción

Las constelaciones satelitales en LEO proporcionan servicios de datos que se pueden implementar con satélites pequeños. Las constelaciones de satélites pequeños representan un menor costo de implementación y un menor tiempo de desarrollo; además hoy en día existen satélites pequeños capaces de manipular grandes cantidades de información (banda S) en pocos minutos (visibilidad con la estación terrena).

Existen diversas universidades que han desarrollado sus propios satélites pequeños y que están interesadas en proyectos interdisciplinarios que impulsen el avance de éste campo mediante el desarrollo de nuevas tecnologías y misiones útiles a la vida humana.

En el presente capítulo se da una breve descripción del proyecto HumSAT, así como brindar una propuesta de sistema de comunicaciones en banda S para ser utilizado en el satélite HumSAT-México, en base a la investigación realizada. Se tomarán en cuenta algunos parámetros como la masa, el precio y los requerimientos con los diferentes subsistemas del satélite.

7.2. Proyecto HumSAT

HumSAT (Humanitary Satellite Network Project) es una iniciativa educativa internacional para construir una constelación de nanosatélites (conformada hasta el momento por más de 25 vehículos espaciales) que ofrecerá servicios básicos de telesalud, comunicación e información de áreas sin infraestructura. La conexión de usuarios se realizara mediante una red de sensores distribuidos en todo el mundo[18]. La interfaz de los sensores hacia la constelacion esta definida en el sitio oficial de la ESA.

7.2.1. Iniciadores del proyecto

Dentro de los principales promotores del proyecto se encuentran 4 instituciones educativas:

- Universidad de Vigo (España) a través del Dr. Fernando Aguado.
- Universidad Politécnica del Estado de California (Estados Unidos) a través del Dr. Jordi Puig-Suari.
- Universidad Nacional Autónoma de México (Mexico) a través del Dr. Esaú Vicente Vivas.
- CRECTEALC (Centro Regional de Enseñanza de Ciencia y Tecnología Espacial para América Latina y el Caribe) a través del Dr. Sergio Camacho.

Ademas se cuenta con el apoyo de organizaciones como la NASA, ESA, IAF (International Astronautical Federation) y UNOOSA (United Nations Office for Outer Space Affairs).

7.2.2. Arquitectura de la red

La arquitectura del sistema HumSAT está compuesta de tres segmentos. La Figura 7.1 muestra el concepto general de la red de HumSAT[1].

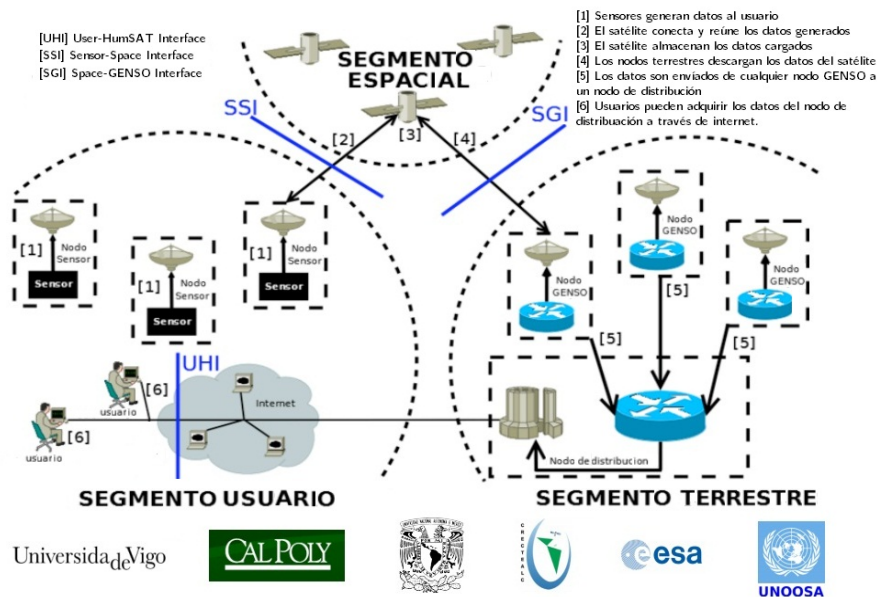


Figura 7.1: Arquitectura HumSAT.

- Segmento Espacial: Está basado en satélites pequeños, algunos de ellos se apegarán al estándar CubeSat¹ como principal característica, aunque también se encuentra abierto a otros estándares.
- Segmento Terrestre: Está basado en la red GENS0 para obtener una cobertura global para la descarga de datos y envío de comandos, y proveer una visibilidad casi continua de los CubeSats.
- Segmento Usuario: Está basado en sensores terrestres de bajo costo. Algunas aplicaciones para estos sensores son: monitoreo de desastres naturales, monitoreo del clima, monitoreo de la contaminación, entre otras. Permite enviar los datos de autenticación de los usuarios para su posterior acceso a los datos, y proporciona las capacidades de comunicación bidireccional entre usuarios en lugares remotos.

¹Estándar desarrollado en 1999 por la Universidad de Stanford y la Politécnica de California. El estándar es un satélite de $10 \times 10 \times 10$ [cm³] (conocido como 1U), y peso aproximado de 1 [Kg]. A partir de esto, hay versiones más equipadas de $10 \times 10 \times 20$ [cm³] (2U) y $10 \times 10 \times 30$ [cm³] (3U).

7.3. Propuesta del sistema de comunicaciones en banda S para el satélite HumSAT-México

Con base a los requerimientos de masa y volumen para el proyecto HumSAT, y a los resultados obtenidos en las simulaciones se sugiere el siguiente sistema de comunicaciones:

- Transmisor ISIS

Características	
Tasa de Transferencia	100 - 38k4 [Kbps]
Potencia de Transmisión	500 [mW]
Frecuencia	2.1 a 2.5 [GHz]
Modulación	BPSK/QPSK
Impedancia de Salida	50 [Ω]
Requerimientos en la plataforma satelital para su integración	
Masa	70 [g]
Volumen	90x96x25 [mm ³]
Alimentación	5 [V] y 3.3 [V]
Interfaz de RF	SMA
Interfaz de datos	I ² C
Interfaz PCB	PC/104
Precio \$ 141 546.00 MXN	

SMA (SubMiniature version A) es un tipo de conector en forma de rosca para cable coaxial que se utiliza en microondas hasta los 18 [GHz].

I²C (Inter-Integrated Circuit) es un bus de comunicaciones serial que se emplea para comunicar microcontroladores (maestros) y sus periféricos (esclavos), utiliza 3 líneas: datos, reloj y tierra.

PCB (Printed Circuit Board) se utiliza para ayudar a conectar eléctricamente componentes electrónicos mediante conductores de cobre grabados en un sustrato.

PC/104 es un estándar de sistema embebido que define el formato de la placa base y el bus del sistema.

La principal razón de selección es que el transmisor se adecúa correctamente al estándar CubeSat, además de que la interfaz I²C permite una mayor capacidad de transferencia de datos.

- Antena de parche SSTL

Características	
Tasa de Transferencia	Arriba de 4 [Mbps]
Potencia	Arriba de 10 [W]
Frecuencia	2.0 a 2.5 [GHz]
Ganancia	7 [dBi]
$\theta_{-3[dB]}$	Alrededor de $\pm 35^\circ$
Polarización	RHCP ó LHCP
Impedancia de entrada	50 [Ω]
Requerimientos en la plataforma satelital para su integración	
Masa	80 [g]
Volumen	82x82x20 [mm ³]
Interfaz de RF	SMA

La principal razón de selección es que la antena se adecúa correctamente al estandar CubeSat, maneja una tasa de transferencia alta y ambas polarizaciones circulares; además posee una ganancia alta y un ancho de haz amplio.

- Estación Terrena Clyde-Space (ISIS) en banda S

Características	
Tasa de Transferencia	100 - 38k4 [Kbps]
Antena	Reflector parabólico de 1.9 [m]
Ganancia	21 [dBic]
Polarización	RHCP
Modulación	BPSK
Ventajas	
Compacta	Permite ser colocada en casi cualquier lugar
Remota	Es posible congurarla y controlarla via internet
Compatible	Con el sistema GENSO
Precio \$ 653 422.00 MXN	

La principal razón de selección es que la estación es compatible con GEN-SO, y su portabilidad la hace fácil de operar.

Con las características anteriormente descritas del sistema de comunicaciones, es posible obtener un buen enlace satelital y con un margen de error de apuntamiento aceptable. Es importante mencionar que este sistema puede ser modificado de acuerdo a la aplicación del satélite.

La Figura 7.2 muestra el sistema de comunicaciones en banda S propuesto para la plataforma satelital HumSAT-México.



Figura 7.2: Sistema de comunicaciones en banda S.

Capítulo 8

Conclusiones y Recomendaciones

8.1. Conclusiones

De la tesis desarrollada se concluye que:

- Los satélites pequeños representan un gran campo de trabajo debido a su rapidez de implementación y al amplio campo de desarrollo tecnológico para diversas aplicaciones.
- La mayoría de los satélites pequeños han operado en frecuencias de radioaficionados (VHF y UHF); sin embargo la demanda de nuevas aplicaciones que requieran grandes cantidades de volúmenes de información obliga a aumentar el rango de frecuencias. La capacidad de transportar mayores cantidades de información, hará que los satélites pequeños tengan un mayor auge en el ámbito comercial y con ello logrará mayores oportunidades de desarrollo.
- Hoy en día, la banda S es la opción más pretendida por los desarrolladores de tecnología de satélites pequeños, aunque este proceso sigue en fase de experimentación para la mayoría de las instituciones. Por calidad y facilidad, se utilizan equipos de comunicaciones comerciales; ya que el desarrollo de un sistema propio implica la realización de múltiples pruebas, entre las que destacan las espaciales, que pueden llevar consigo diferentes dificultades de implementación, resultando en algunas ocasiones, más caro el desarrollo que el adquirir un equipo comercial.

- Debido a que el satélite solo esta visible para la estación terrena en un lapso corto de tiempo (alrededor de 12 minutos), se vuelve indispensable tener una alta tasa de transferencia de datos para lograr la descarga de grandes volúmenes de datos. El aumento en la tasa de transmisión de datos hace imprescindible el tener un control adecuado sobre los errores (BER), para ello es necesario el correcto apuntamiento de las antenas en el sistema de comunicaciones y por tanto del satélite mismo; de acuerdo a la distancia del enlace, la potencia de transmisión, la frecuencia, la tasa de transferencia, entre otros parámetros, se determina un cierto margen de error para el apuntamiento de las antenas.
- En cuanto al análisis de las simulaciones, se desprenden las siguientes conclusiones:
 - El cálculo del enlace satelital es muy complejo puesto que depende de diversos factores, de los cuales la mayoría tiene un comportamiento que no es prescindible al 100 %. En el modelo realizado en esta tesis, el enlace está en función de tres parámetros principales: frecuencia de operación, tasa de transmisión y ángulo de elevación de la antena en la estación terrena. La frecuencia se fija a banda S pero, de igual manera que la tasa de transmisión, su aumento implica mayores pérdidas. El ángulo de elevación es una medida de las pérdidas introducidas en la antena de la estación terrena debido al sitio de ubicación.
 - Los parámetros para el enlace son los ofrecidos por los equipos comerciales en banda S y los parámetros típicos utilizados por las compañías. La modificación de cualquiera de ellos implica un nuevo cálculo de enlace, y por ende un nuevo resultado. Los parámetros por defecto que utiliza el software Radio Mobile se pueden modificar para ajustarse de mejor manera a la situación de ubicación y se verá afectada la potencia de recepción.
 - Se observó que por cada 100 [Km] de aumento en la distancia del enlace, las pérdidas aumentaban alrededor de 1 [dB] en LOS. Así mismo, en las gráficas se observa que la pendiente aumenta y por tal motivo el margen de error se hace más estrecho. Por otro lado, se observó que el aumento en la tasa de transmisión provoca un considerable aumento en el BER y por ende una considerable disminución en el margen de error.

- Las gráficas muestran que el peor de los casos es para un ángulo de elevación de 5° y una distancia de 800 [Km], donde se tiene la mayor cantidad de pérdidas; para una tasa de transmisión típica en banda S (2 [Mbps]) se tiene un margen de error menor a 1° , por lo que para tener un sistema de comunicaciones directivo en banda S es necesario estabilizar el satélite dentro de ese margen.
 - Para aumentar el margen de error de apuntamiento se puede aumentar el ángulo de elevación, disminuir el BER aceptable, aumentar la potencia de transmisión, disminuir la distancia del enlace, aumentar la ganancia de las antenas, disminuir el ruido en la estación terrena. Es importante mencionar que el BER aceptable establece el margen de error de apuntamiento y puede aumentar o disminuir de acuerdo a la aplicación del satélite.
- Con base en los sistemas comerciales, y a los resultados obtenidos en las simulaciones se observa un adecuado margen de error de apuntamiento. Si dicho margen es sobrepasado, entonces la calidad del enlace comienza a disminuir. Una solución es aumentar la potencia de transmisión, sin embargo en el ámbito espacial la potencia es un factor que se ve reflejado económicamente. Otra solución es tener equipos muy precisos, lo cual también se ve reflejado económicamente.
 - Los resultados obtenidos en esta tesis sirven, en primera aproximación, para definir el subsistema de estabilización del satélite, ya que con ellos se podrá determinar el margen de maniobra que deberán tener los dispositivos de estabilización para sostener un enlace satelital correcto.

8.2. Recomendaciones

De acuerdo al trabajo presentado se puede recomendar:

- Mantener un monitoreo constante con las diferentes compañías que desarrollan equipos de comunicaciones en banda S para satélites pequeños, para poder actualizar los parámetros y las mejoras que se obtengan, ya que hoy en día prácticamente existen dos competidores en cuanto al desarrollo de estos sistemas para satélites pequeños, ISIS y el SSTL.
- Para enlaces punto a punto en LOS, el modelo utilizado (Longley-Rice) por el software (Radio Mobile) es un poco viejo aunque se sigue utilizando. Existe un modelo más reciente publicado por la UIT a través de su recomendación 1546, sin embargo no ha habido aún algún software libre que implemente este modelo.
- El modelo del enlace satelital puede ser más detallado y complejo. Para este trabajo, el modelo del enlace se basó en modelos semiempíricos que pueden ser sustituidos por modelos científicos más exactos, lo cual involucraría un mayor tiempo de desarrollo.
- Los resultados obtenidos son una primera aproximación de lo que sucede realmente, para obtener datos más exactos es necesario validar los resultados. Para dicha validación, es necesario el tener un sistema de comunicaciones y realizar pruebas con el, por lo que debido a cuestiones financieras, los resultados solo se quedan en simulaciones.
- Para la adquisición de datos, en cuanto a escala de ángulo, menores a un grado es necesario utilizar un software que permita escalas mínimas de fracciones de grado o en su defecto realizar cálculos manualmente. Para este trabajo, solo se realizan aproximaciones mediante las gráficas de las simulaciones.

Apéndice A

Simulaciones de enlace

En este apéndice se muestran algunas de las simulaciones realizadas con Radio Mobile, en donde se muestran las características de los parámetros de entrada y salida.

A.1. Patrón de radiación

A continuación se muestran los patrones de radiación utilizados para la antena transmisora (satélite) y para la antena receptora (estación terrena).

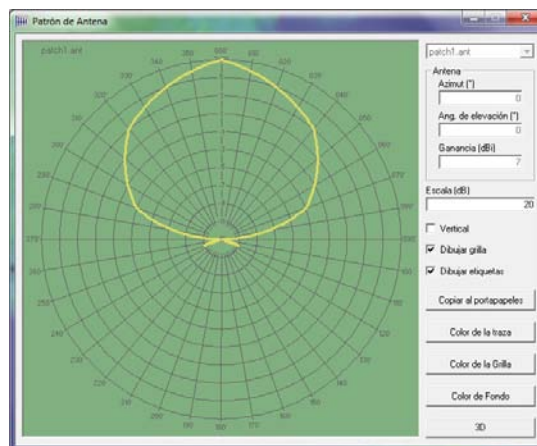


Figura A.1: Patrón de radiación de la antena del satélite (antena de parche).

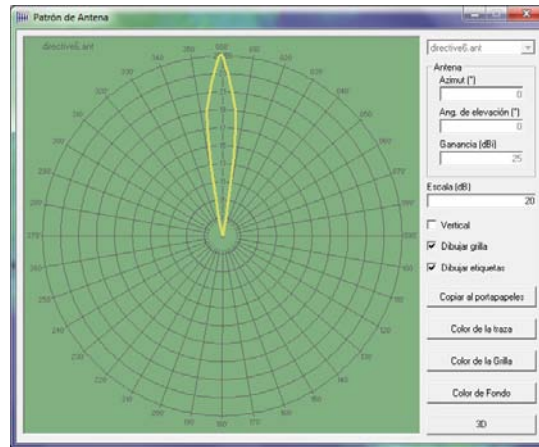


Figura A.2: Patrón de radiación de la antena de la estación terrena (antena de reflector parabólico).

A.2. Simulaciones

Las Figuras A.3, A.4 y A.5 muestran el ejemplo de una simulación, en especial, la simulación para 380 [Km].

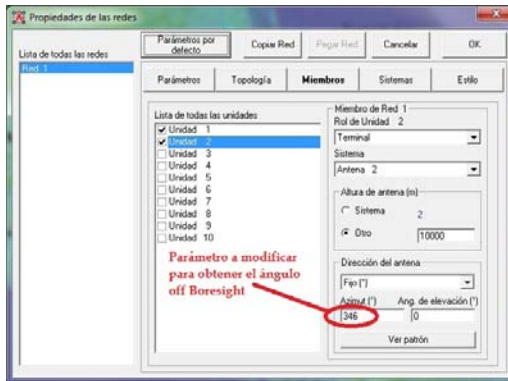


Figura A.3: Variable independiente para las gráficas (ángulo off Boresight).

Es importante mencionar que la escala mínima de manipulación para el azimut es 1° . Por lo que, al sumar 1° se hace referencia de un movimiento de la antena hacia el lado derecho, y al restar 1° se hace referencia de un movimiento de la antena hacia el lado izquierdo. Se realizaron 20 medidas de

cada lado manteniendo el ángulo de elevación constante, por cada medición se realizó una simulación.

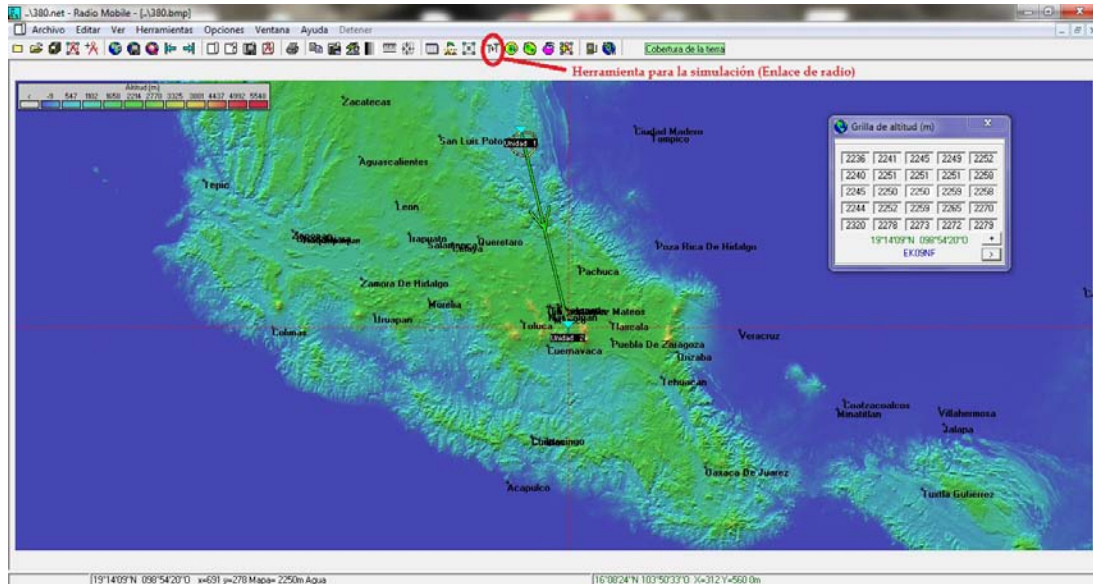


Figura A.4: Red configurada para el enlace de 380 [Km].

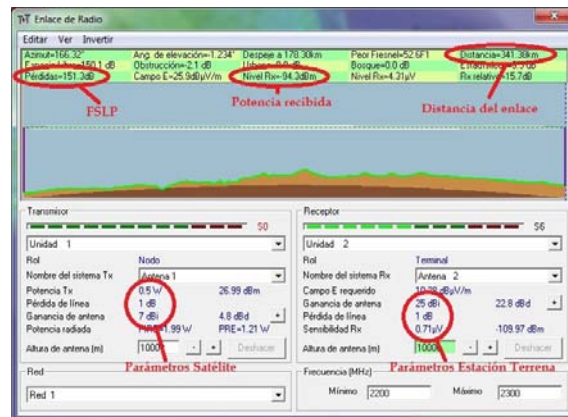


Figura A.5: Simulación en Enlace de radio para una distancia de 380 [Km].

La potencia de recepción es dada en [dBm], para pasarla a [dB] solo hay que restar 30. Por cada modificación del ángulo en la antena de la estación receptora, se obtiene un resultado que es base para el cálculo del enlace.

De manera análoga, la Tabla A.2 muestra los resultados obtenidos en Radio Mobile para las diferentes distancias.

Ángulo off Boresight	Señal recibida [dB] a 400 [Km]	Señal recibida [dB] a 500 [Km]	Señal recibida [dB] a 600 [Km]	Señal recibida [dB] a 700 [Km]	Señal recibida [dB] a 800 [Km]
-20	-152.5	-154.8	-155.9	-157.4	-159
-19	-151.5	-153.8	-154.9	-156.4	-158
-18	-150.5	-152.8	-153.9	-155.4	-157
-17	-149.5	-151.8	-152.9	-154.4	-156
-16	-148.5	-150.8	-151.9	-153.4	-155
-15	-147.5	-149.8	-150.9	-152.4	-154.1
-14	-146.5	-148.8	-149.9	-151.4	-153.1
-13	-145.5	-147.8	-148.9	-150.4	-152.1
-12	-144.2	-146.8	-147.3	-148.7	-150.9
-11	-142.2	-144.8	-145.3	-146.7	-148.9
-10	-140.2	-142.8	-143.3	-144.7	-146.9
-9	-137.9	-140.8	-140.7	-142	-144.7
-8	-134.9	-137.8	-137.7	-139	-141.7
-7	-132.2	-134.8	-135.3	-136.7	-138.9
-6	-130.5	-132.8	-133.9	-135.4	-137.1
-5	-129.6	-131.8	-132.9	-134.4	-136.1
-4	-128.6	-130.8	-131.9	-133.4	-135.1
-3	-127.6	-129.8	-130.9	-132.4	-134.1
-2	-126.6	-128.8	-129.9	-131.4	-133.1
-1	-125.6	-127.8	-128.9	-130.4	-132.1
0	-124.8	-126.8	-128.5	-130.1	-131.3
1	-125	-126.8	-129.1	-130.8	-131.5
2	-126	-127.8	-130.1	-131.8	-132.5
3	-127	-128.8	-131.1	-132.8	-133.5
4	-128	-129.8	-132.1	-133.8	-134.5
5	-129	-130.8	-133.1	-134.8	-135.5
6	-130	-131.8	-134.1	-135.8	-136.5
7	-131.2	-132.8	-135.7	-137.5	-137.5
continúa...					

Ángulo off Boresight	Señal recibida [dB] a 400 [Km]	Señal recibida [dB] a 500 [Km]	Señal recibida [dB] a 600 [Km]	Señal recibida [dB] a 700 [Km]	Señal recibida [dB] a 800 [Km]
8	-133.6	-134.8	-138.9	-140.9	-139.7
9	-137.6	-138.8	-142.9	-144.9	-143.7
10	-141.2	-142.8	-145.7	-147.5	-147.5
11	-143.2	-144.8	-147.7	-149.5	-149.5
12	-145	-146.8	-149.1	-150.8	-151.4
13	-146	-147.8	-150.1	-151.8	-152.4
14	-147	-148.8	-151.1	-152.8	-153.4
15	-148	-149.8	-152.1	-153.7	-154.4
16	-149	-150.8	-153.1	-154.7	-155.4
17	-150	-151.8	-154.1	-155.7	-156.4
18	-151	-152.8	-155.1	-156.7	-157.4
19	-152	-153.8	-156.1	-157.7	-158.4
20	-153	-154.8	-157.1	-158.7	-159.4

Tabla A.2: Resultados de simulación para diferentes distancias.

NOTA: Es importante mencionar que las simulaciones fueron realizadas con un ángulo de elevación igual a 0° , es decir, en línea de vista sobre la horizontal. Las pérdidas por ángulo de elevación son agregadas en los cálculos.

Apéndice B

Ejemplo del cálculo de enlace

En este apéndice se muestra, en la Tabla B.2, los cálculos realizados para complementar las simulaciones del ejemplo a 380 [Km]. Se muestra el ejemplo a una tasa de 1 [Mbps], un ángulo de elevación de 5° @ 2.25 [GHz].

Ángulo off Boresight	Señal recibida [dB]	$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{des}$ [dB]	$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{des}$ [dB]	$x = \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}$	BER=Q(x)
-20	-151.9	51.566	-8.4339	0.535569	0.296128
-19	-150.9	56.566	-7.4339	0.600918	0.273947
-18	-149.9	53.566	-6.4339	0.674241	0.250078
-17	-148.9	54.566	-5.4339	0.756511	0.224671
-16	-147.9	55.566	-4.4339	0.84882	0.197990
-15	-146.9	52.566	-3.4339	0.952392	0.170449
-14	-145.9	57.566	-2.4339	1.068601	0.142624
-13	-144.9	58.566	-1.4339	1.198990	0.115265
-12	-143.5	59.966	-0.0339	1.408691	0.07946
-11	-141.5	61.966	1.9660	1.773437	0.038078
-10	-139.5	63.966	3.9660	2.232624	0.012786
-9	-137.1	66.366	6.3660	2.943172	0.001624
-8	-134.1	69.366	9.3660	4.157342	1.609E-05
-7	-131.5	71.966	11.9660	5.608100	1.02E-08
-6	-129.9	73.566	13.5660	6.742419	7.788E-12
-5	-128.9	74.566	14.5660	7.565119	1.937E-14
continúa...					

Ángulo off Boresight	Señal recibida [dB]	$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{des}$ [dB]	$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{des}$ [dB]	$x = \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}$	BER=Q(x)
-4	-127.9	75.566	15.5660	8.488203	1.049E-17
-3	-126.9	76.566	16.5660	9.523920	8.338E-22
-2	-125.9	77.566	17.5660	10.68601	5.917E-27
-1	-124.9	78.566	18.5660	11.98990	2.00E-33
0	-124.3	79.166	19.1660	12.84741	4.446E-38
1	-124.7	78.766	18.7660	12.26918	6.628E-35
2	-125.7	77.766	17.7660	10.93492	3.923E-28
3	-126.7	76.766	16.7660	9.745761	9.616E-23
4	-127.7	75.766	15.7660	8.685919	1.878E-18
5	-128.7	74.766	14.7660	7.741333	4.918E-15
6	-129.7	73.766	13.7660	6.89947	2.609E-12
7	-131.1	72.366	12.3660	5.872401	2.147E-09
8	-133.9	69.566	9.5660	4.25417	1.049E-05
9	-137.9	65.566	5.5660	2.684205	0.003635
10	-141.1	62.366	2.3660	1.857016	0.031654
11	-143.1	60.366	0.3660	1.47508	0.070095
12	-144.7	58.766	-1.2339	1.226918	0.109926
13	-145.7	57.766	-2.2339	1.093492	0.137088
14	-146.7	56.766	-3.2339	0.974576	0.164885
15	-147.7	55.766	-4.2339	0.868591	0.192535
16	-148.7	54.766	-5.2339	0.774133	0.219425
17	-149.7	53.766	-6.2339	0.689947	0.245113
18	-150.7	52.766	-7.2339	0.614915	0.269305
19	-151.7	51.766	-8.2339	0.548044	0.291830
20	-152.7	50.766	-9.2339	0.488445	0.312617

Tabla B.2: Cálculos para el enlace a 380 [Km].

NOTA: Es importante mencionar que la obtención y relación de cada valor, fueron descritos en el capítulo 1 y en el capítulo 5. Así mismo, se recomienda tener en cuenta los parámetros con los cuales se simuló el enlace (capítulo 6).

De manera análoga, para los demás cálculos, al modificar la distancia y/o el ángulo de elevación entonces las pérdidas introducidas al enlace cambian, por lo que también se modifica la relación:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{des} [dB]$$

Al modificar la tasa de transmisión entonces la cantidad de bits cambian, por lo que también se modifica la relación:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{des} [dB]$$

Referencias

- [1] F. Aguado, J. Puig-Suari, S. Camacho, E. Vicente Vivas, A. Castro, W. Balogh, and V. Reglero. *The HumSAT Constellation*. International Astronautical Federation, http://www.iafastro.com/docs/2010/iac/nanosat/13_Aguado.pdf.
- [2] The Radio Amateur Satellite Corporation AMSAT. <http://www.amsat.org/amsat-new/index.php>.
- [3] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory, Analysis and Design*. John Wiley & Sons Ltd, 2da. edición, Estados Unidos, 1997.
- [4] Bruce A. Blevins. *Small Satellite Antennas*. Antenna Development Corporation, <http://www.antdevco.com/ADC-0807201342%20-%20R0%20Small%20Satellite%20Antenna%20Paper.htm>.
- [5] Charles D. Brown. *Elements of Spacecraft Design*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Estados Unidos, 1ra. edición, 2002.
- [6] Maria-Mihaela Burlacu and Pascal Lorenz. *A survey of small satellites domain: challenges, applications and communications key issues*. ICST's Global Community Magazine, <http://icast-magazine.org/2010/09/survey-small-satellites-domain-challenges-applications-and-communications-key-issues>.
- [7] Clyde-Space. <http://www.clyde-space.com/>.
- [8] Unión Internacional de Telecomunicaciones. *Recomendación UIT-R P.618-5*.
- [9] Unión Internacional de Telecomunicaciones. *Recomendación UIT-R P.837-1*.

- [10] Unión Internacional de Telecomunicaciones. *Recomendación UIT-R P.838*.
- [11] B. G. Evans. *Satellite Communication Systems*. The Institution of Engineering and Technology, 3ra. edición, Inglaterra, 2008.
- [12] Peter Fortescue, John Stark, and Graham Swinerd. *Spacecraft Systems Engineering*. John Wiley & Sons Ltd, 3ra. edición, Inglaterra, 2008.
- [13] S. Gao, K. Clar, M. Unwin, J. Zackrisson, W. A. Shiroma, J. M. Akagf, K. Maynarcf, P. Garner, L. Boccia, G. Amendola, G. Massa, C. Underwood, M. Brenchley, M. Pointer, and M. N. Sweeting. *Antennas for Modern Small Satellites*. IEEE Xplore, http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5338683.
- [14] Ruth García, Adrián Torregrosa, Andrés García, and Ángel Cifuentes. *Antenas Embarcadas en Satélites*. Universidad Politécnica de Valencia, http://www.upv.es/satelite/trabajos/Grupo9_99.00/index.html.
- [15] Gary D. Gordon and Walter L. Morgan. *Principles of Communications Satellites*. John Wiley & Sons Ltd, 1ra. edición, Estados Unidos, 1993.
- [16] Yiming He and Xianyi Qian. *Performance of High-Power Transmitter which used in Satellite Communication of Earth Station*. IEEE Xplore, http://ieeexplore.ieee.org/search/freesrabstract.jsp?tp=&arnumber=5659075&queryText%3DPerformance+of+HighPower+Transmitter+which+used+in+Satellite+Communication+of+Earth+Station%26openedRefinements%3D*%26searchField%3DSearch+All.
- [17] G. A. Hufford, A. G. Longley, and W. A. Kissick. *A guide to use ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode*. Departamento de Comercio de Estados Unidos, 1982.
- [18] Humanitary Satellite Network Project HumSAT. <http://www.humsat.org/>.
- [19] Ángel Martínez Jiménez. *Tesis Doctoral: Diseño de un Sistema de Comunicaciones para Satélite de Órbita Baja Basada en Modulaciones de Fase Continua*. Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. de Telecomunicación, 2000.

- [20] Louis J. Ippolito Jr. *Satellite Communications Systems Engineering*. John Wiley & Sons Ltd, 1ra. edición, Inglaterra, 2008.
- [21] Surrey Satellite Technology Ltd. <http://www.sstl.co.uk/>.
- [22] Anil K. Maini and Varsha Agrawal. *Satellite Technology, Principles and Applications*. John Wiley & Sons Ltd, 1ra. edición, Inglaterra, 2007.
- [23] Gérard Maral and Michel Bousquet. *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*. John Wiley & Sons Ltd, 4ta. edición, Estados Unidos, 2002.
- [24] About Radio Mobile. <http://radiomobile.pe1mew.nl/?Welcome...>
- [25] Delft University of Technology. <http://www.delfispace.nl/>.
- [26] Small Satellite Home Page. <http://centaur.sstl.co.uk/SSHP/index.html>.
- [27] Universidad Alas Peruanas. *Avances del Proyecto UAPSat*. <http://uapsat.info/>.
- [28] Bernard Sklar. *Digital Communications, Fundamentals and Applications*. Prentice Hall, 2da. edición, Estados Unidos, 2001.
- [29] Innovative Solutions In Space. <http://www.isispace.nl/>.
- [30] Cita textual de la información vía e-mail que proporcionó la Universidad de Surrey (info@sstl.co.uk).
"S-band communications are used in al satellite systems for satellite telemetry and telecommand, as well as radio ranging (position determination). [abbreviated TT&C]
S-band is also used in some equatorial satellite communication systems to provide television in areas where the atmospheric attenuation due to rain is too great to use the more conventional frequencies. The "Big LEO" satellite constellations also use S-band communications to provide a global communications network using relatively small hand-held terminals.
The ADCS for these satellites is different depending on which one of these applications is used, although all of them use nadir pointing modes with the satellite maintaining pointing towards the sub-satellite

point. The required accuracy depends on the size of the communications beam, and is typically 0.1 degree in most applications, but in some applications can be less critical.

Depending on your definition of "small satellites", the majority of small satellites operating outside the radio amateur bands will use S-band for TT&C. SSTL builds S-band equipment for such missions and you can find datasheets for transmitters, receivers and antennas here (<http://www.sstl.co.uk/getdoc/4a2a88ad-3357-45c6-8d24-51fe63f0413f/Sub-system-Datasheets>). This page also includes typical Attitude control actuators and sensors which are used on small satellites.

* For ground stations, pointing accuracy is usually determined by avoiding excessive losses - ie usually 0.1-1.0dB pointing losses.

* Typical BER for telemetry and telecommand is $10e-6$, although some systems operate at much better BER if they do not employ Forward Error Correction or Automatic Request for Repeat (ARQ protocols).

Link budget design is covered well in books by Prof Evans of the University of Surrey (http://www.amazon.co.uk/Satellite-Communication-Systems-Telecommunications-PBTE0380/dp/085296899X/ref=sr_1_3?s=books&ie=UTF8&qid=1301396859&sr=1-3) [note that there are cheaper versions of this].

- [31] Wayne Tomasi. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Pearson Educación, 4ta. edición, México, 2003.
- [32] Space Flight Laboratory University of Toronto Institute for Aerospace Studies. <http://www.utias-sfl.net/index.html>.
- [33] Rodolfo Neri Vela. *Comunicaciones por Satélite*. Thomson, 1ra. edición, México, 2003.