



**UNIVERSIDAD POPULAR AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE PUEBLA**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE ELECTRÓNICA**

***IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR
EN EL SEGMENTO TERRESTRE
DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1***

**Trabajo de Investigación
que para obtener el Título de
INGENIERA MECATRÓNICA**

**Presenta:
SARAHY CONTRERAS LIMA**

Puebla, Pue; México

Agosto 2019



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyła**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

El uso de textos, imágenes, gráficas, 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 de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



AGRADECIMIENTOS

La presente tesis esta dedicada en primer lugar a Dios, fuente de toda sabiduría y amor, que me ha iluminado durante mi vida para poder encaminar mis pasos a utilizar los conocimientos adquiridos en beneficio de la sociedad.

A mis padres, Victor y María Antonia, por guiarme, amarme y apoyarme a lo largo de mi carrera profesional brindandome su tiempo y comprensión para superar las adversidades, y recordandome día a día que el servicio al projimo es la clave de la felicidad.

A mis hermanos, Paty, Vicko, Oscar, Cecy, Mimí, Eva y Joel, quienes a lo largo de mi carrera profesional me impulsaron a lograr mis objetivos mediante su ejemplo y dedicación por sus carreras, asi como también siempre mantuvieron firmes sus esperanzas en mí y me brindaron todo su amor y comprensión.

A mis amigos, profesores y compañeros, que cada día me motivaron con su cariño y apoyo para que culminara con éxito todas mis metas.

Al Fondo Sectorial AEM-CONACYT por colaborar y apoyar en el proyecto número 292767, titulado "Diseño y construcción del módulo de enlace intersatelital "AztechSat-1"-Globalstar".

Puebla, Pue., Agosto 2019

Sarahy Contreras Lima



Índice general

AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	xx
ABSTRACT	x
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 EL PROYECTO AZTECHSAT-1	1
1.2 SEGMENTO TERRESTRE DE AZTECHSAT-1	1
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.4 OBJETIVO	1
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES	1
1.6 FACTIBILIDAD DEL PROYECTO	1
1.7 JUSTIFICACIÓN	1
CAPÍTULO II	6
NANOSATÉLITES: CUBESAT	6
2.1 BREVE HISTORIA	6
2.2 OBJETIVO	7
2.3 ESPECIFICACIONES	7
2.4 ÓRBITAS	8
CAPÍTULO III	12
TEORIA DE COMUNICACIONES	12
3.1 UN POCO DE HISTORIA	12
3.2 ONDA ELECTROMAGNETICA	13
3.3 EFECTO DOPPLER	15
3.4 BANDAS DE FRECUENCIAS	16
3.5 ELEMENTOS BÁSICOS DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICOS	17
3.6 TIPOS DE SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICOS	18
3.6.1 Frecuencias satelitales de uso comercial	19
3.7 MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN	20



3.7.1 Técnicas de Modulación	22
3.7.1.1 AM.....	22
3.7.1.2 FM.....	23
3.7.1.3 PM.....	23
3.7.1.4 ASK.....	24
3.7.1.5 FSK.....	25
3.7.1.6 PSK.....	26
3.8 MODOS DE TRANSMISIÓN	26
3.8.1 Modo Simplex.....	26
3.8.2 Modo Semidúplex.....	27
3.8.3 Modo Dúplex Total.....	28
3.8.4 Modo Dúplex Total/General.....	29
CAPÍTULO IV	31
TEORIA DE COMUNICACIÓN DEL NANOSATÉLITE	31
4.1 CUBESAT SPACE PROTOCOL.....	31
4.2 PROTOCOLO ASM+Golay.....	33
4.3 DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ERRORES.....	35
4.3.1 Validación del marco CRC32.....	35
4.3.2 Codificación Reed Solomon.....	35
4.3.3 Aleatorización CCSDS.....	36
4.3.4 Autenticación de mensajes basada en Hash (HMAC).....	37
4.4 MODULACIÓN GFSK.....	37
CAPÍTULO V	40
ELEMENTOS DEL SEGMENTO TERRESTRE	40
5.1 VISIÓN GENERAL DEL MÓDULO UHF NANOCOM AX100.....	40
5.1.1 Parámetros básicos de NanoCom AX100.....	42
5.1.2 Diagrama de bloques del módulo AX100.....	43
5.1.3 Interfaces de entrada/salida del AX100.....	44
5.2 ANTENA NANOCOM ANT430.....	45
5.2.1 Parámetros básicos de NanoCom ANT430.....	46



5.3 COMPUTADORA DE LA ESTACIÓN TERRENA NANOCOM MS100 Y SOFTWARE PARA CONTROLAR EL SATÉLITE	49
5.4 TRANSCEPTOR NANOCOM GS100.....	50
5.4.1 Parámetros básicos del Transceptor NanoCom GS100	54
5.4.2 Diagrama de bloques del NanoCom GS100	55
5.5 CONTROL DEL ROTOR.....	56
5.5.1 Interfaz del controlador del rotor YAESU-232B	56
5.5.2 Rotor YAESU G-5500	57
5.6 ANTENA 436CP42UG.....	59
5.6.1 Especificaciones de Antena 436CP42UG	61
5.6.2 Cable RG8U para transmisión por radiofrecuencia.....	62
5.7 PREAMPLIFICADOR SP-70	62
CAPÍTULO VI.....	67
REQUERIMIENTOS DEL SEGMENTO TERRESTRE	67
CAPÍTULO VII.....	73
LINK BUDGET, TELECOMANDOS Y TELEMETRIA	73
7.1 LINK BUDGET.....	73
7.1 TELECOMANDOS Y TELEMETRIA.....	77
7.1.1 Telecomandos	78
7.1.2 Telemetría	79
CAPÍTULO VIII.....	85
SISTEMA DE PRUEBAS.....	85
8.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA	85
8.2 PRUEBA DE COMUNICACIÓN.....	87
8.2.1 Prueba de Recepción y Transmisión en la Estación Terrena.....	87
8.2.1 Prueba de Potencia de Transmisión en la Estación Terrena.....	96
CAPÍTULO IX	103
RESULTADOS Y CONCLUSIONES	103
9.1 RESPUESTAS DE TELECOMANDOS ENVIADOS DESDE LA ESTACION TERRENA	103
9.2 DISCUSIÓN.....	107
9.3 CONCLUSIONES.....	108



9.4 TRABAJO FUTURO: PLAN DE OPERACIÓN RADIO COMUNICACIÓN	108
GLOSARIO	116
REFERENCIAS	121

Índice de Figuras

Figura. 1.1. Modelo de AzTechSat-1	2
Figura 2.1. Alturas orbitales de los satélites.....	10
Figura 3.1. Representación de Onda Electromagnética.....	13
Figura 3.2. Radiación Electromagnética.....	14
Figura 3.3. Representación Longitud de onda.....	14
Figura 3.4. Efecto Doppler.....	15
Figura 3.5. Sistema de comunicación inalámbrico.....	18
Figura 3.6. Diagrama de Modulación.....	21
Figura 3.7. Técnicas de Modulación.....	22
Figura 3.8. Amplitud Modulada AM.....	23
Figura 3.9. Frecuencia Modulada FM.....	23
Figura 3.10. Modulación de Fase.....	24
Figura 3.11. Modulación de Desplazamiento de Amplitud.....	25
Figura 3.12. Modulación de Desplazamiento de Frecuencia.....	25
Figura 3.13. Modulación de Desplazamiento de Fase.....	26
Figura 3.14. Módulo Simplex STINGR.....	27
Figura 3.15. Estación Terrena, Módulo Semidúplex.....	28
Figura 3.16. Celulares, Módulos Dúplex total.....	29
Figura 3.17. Modo Dúplex Total/General.....	29
Figura 4.1. Escenario de red CSP.....	32
Figura 4.2. Diseño del marco Golay.....	34
Figura 4.3. Relación con las capas de OSI.....	36
Figura 4.4. Modulación GFSK.....	38
Figura 5.1. NanoCom AX100 (AX100).....	4;Error! Marcador no definido.
Figura 5.2. Diagrama de Bloques Funcional de NanoCom AX100.....	44



Figura 5.3. Sistema de antenas desplegable NanoCom ANT430.....	46
Figura 5.4. Dimensiones físicas de NanoCom ANT430.	48
Figura 5.5. Panel frontal del NanoCom MS100.....	50
Figura 5.6. Parte posterior del NanoCom MS100.	50
Figura 5.7. Transceptor NanoCom GS100.	5;Error! Marcador no definido.
Figura 5.8. Placa con dos AX100 montados.	52
Figura 5.9. Parte frontal de NanoCom GS100.....	53
Figura 5.10. Parte posterior de NanoCom GS100.....	53
Figura 5.11. Diagrama de Bloques Funcional de NanoCom GS100.....	56
Figura 5.12. Controlador del Rotor YAESU-232 B.	57
Figura 5.13. Azimut y Elevación.....	58
Figura 5.14. Yaesu G-5500 Rotor.	59
Figura 5.15. Antena 436CP42UG montada en UPAEP.	60
Figura 5.16. Cable coaxial RG8U.	62
Figura 5.17. Preamplificador de bajo ruido SP-70.	64
Figura 5.18. Diagrama de Operación del Segmento Terrestre.	65
Figura 7.1. Geometría de la órbita LEO.	74
Figura 7.2. Pérdida de trayectoria de la órbita seleccionada.	74
Figura 7.3. Resumen del desempeño del sistema.	76
Figura 7.4. Formato de ASM+Golay.....	78
Figura 7.5. Comandos del enlace ascendente.	79
Figura 7.6. Comandos del enlace descendente.	83
Figura 7.7. Ejemplo del código en Eclipse.....	84
Figura 8.1. Diagrama general de componentes del Segmento Terrestre.	86
Figura 8.2. Diagrama de conexión entre MS100 y GS100.....	87
Figura 8.3. Revisión de csp-doppler, csp-term, AX100 Primario y AX10 Secundario.	88
Figura 8.4. Revisión de servicios.	89
Figura 8.5. Ping 29 (AX100 primario), Ping 30 (AX100 secundario).....	89
Figura 8.6. Puertos Seriales	90
Figura 8.7. Minicom TTYUSB1.	91



Figura 8.8. Terminal tio.....	91
Figura 8.9. Parámetros de Tabla 0: Configuración del Sistema.	92
Figura 8.10. Parámetros de Tabla 1: Configuración del Receptor.	93
Figura 8.11. Parámetros de Tabla 5: Configuración del Transmisor.	94
Figura 8.12. Ping 5 desde Estación Terrena hacia AzTechSat-1.....	94
Figura 8.13. Ping 29 desde AzTechSat-1 hacia Estación Terrena.....	95
Figura 8.14. Enrutamiento entre nodos csp, comando log list y log print csp I.	95
Figura 8.15. Depuración de comunicación, debug csp i.....	96
Figura 8.16. Valores estándar de ROE.	97
Figura 8.17. Medidor de potencia MFJ-847.....	97
Figura 8.18. Conexiones entre GS100 y MFJ-847.	98
Figura 8.19. Conexiones para prueba de medición de potencia	99
Figura 8.20. Potencia mínima transmitida.....	99
Figura 8.21. Potencia máxima transmitida.	100
Figura 9.1. Descarga de beacon.....	104
Figura 9.2. Prueba telecomando hkra	105
Figura 9.3. Prueba telecomando stingrc1	105
Figura 9.4. Pruebas telecomandos: shutdown1, shutdown2, shutdown3	106
Figura 9.5. Prueba comando ftp download file /flash/hk_files.txt	107
Figura 9.6. Comandos disponibles de csp-term.....	112
Figura 9.7. Comando satup.....	112
Figura 9.8. Respuesta enviada desde el satélite hacia estación terrena.	113
Figura 9.9. Comando para descargar información del satélite.	113
Figura 9.10. Comando para descargar estado de salud del satélite.	113



Índice de Tablas

Tabla 2.1. Tipos de órbitas.	9
Tabla 3.1. Bandas de Frecuencia de acuerdo a ITU.	16
Tabla 3.2. Gamas de Frecuencia.....	17
Tabla 3.3. Bandas de Frecuencia con Símbolo Literal.	19
Tabla 5.1. Especificaciones técnicas NanoCom AX100	42
Tabla 5.2. Parámetros del sistema de antenas desplegables.	47
Tabla 5.3. Especificaciones técnicas NanoCom GS100.....	54
Tabla 5.4. Especificaciones técnicas Antena 436CP42UG	6;Error! Marcador no definido.
Tabla 6.1. Requerimientos Nivel 1 del Segmento Terrestre.....	67
Tabla 6.2. Requerimientos Nivel 2 del Segmento Terrestre.....	68
Tabla 6.3. Requerimientos Nivel 3 del Segmento Terrestre.....	69
Tabla 6.4. Requerimientos Nivel 4 del Segmento Terrestre....	7;Error! Marcador no definido.
Tabla 7.1. Parámetros calculados de Link Budget para la Estación Terrena del AzTechSat-1.	76
Tabla 7.2. Parámetros de comunicación.....	77
Tabla 7.3. Telecomandos.....	78
Tabla 7.4. Estructura del beacon.	80
Tabla 7.5. Datos del HK.	80
Tabla 8.1. Parámetros de alimentación.....	88



RESUMEN

Una de las funciones principales de un satélite es la capacidad de intercambiar información con una estación terrestre. El presente proyecto consiste en la implementación del transceptor GS100 en el segmento terrestre localizado en UPAEP, el cual permitirá la comunicación con el CubeSat AztechSat-1. El enlace de comunicación entre el satélite y la estación terrena se realizará en la banda UHF (Ultra High Frequency), con un ancho de banda ubicado entre 435-438 MHz, en modo de transmisión semidúplex. La operación del AzTechSat-1 es telecomandada directamente desde la estación terrena utilizando modulación digital GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) y el protocolo de capa de enlace de datos ASM+Golay. El segmento terrestre se enfatiza en la utilización de transceptor GS100 y la computadora MS100 que hacen posible la transmisión y recepción de datos entre el satélite y la estación terrena, logrando así la modulación y codificación de los mensajes.

ABSTRACT

One of the main functions of a satellite is the ability to exchange information with a ground station. The present project consists in the implementation of the GS100 transceiver in the ground segment located in UPAEP, which will allow the communication with the AztechSat-1 CubeSat. The communication link between the satellite and the ground station is made through the UHF band (Ultra High Frequency) with a bandwidth between 435-438 MHz in half-duplex transmission mode. The operation of the AzTechSat-1 is directly controlled from the ground station by using GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) digital modulation and the ASM+Golay data link layer protocol. In this thesis, emphasis is placed on the use of the GS100 transceiver and the MS100 computer that make it possible the transmission and reception data between the satellite and the ground station, allowing modulating and coding the messages to be used.



***IMPLEMENTACIÓN DE TRANSEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1***



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP), en colaboración con la Agencia Espacial Mexicana (AEM) y la National Aeronautics and Space Administration (NASA), desarrolló un nanosatélite de vuelo de tipo CubeSat, el cual es un estándar de satélite de 10 cm por arista y una masa inferior a 2.2 Kg.

La importancia de poder establecer comunicación entre el satélite y Tierra es primordial, por lo cual en el presente proyecto se detalla la implementación de un transceptor en la estación terrena para lograr la comunicación exitosa del satélite.

1.1 EL PROYECTO AZTECHSAT-1

AzTechSat-1 es un CubeSat de 1U desarrollado por estudiantes y profesores de la UPAEP, cuya misión principal es establecer comunicación con la constelación de satélites Globalstar, satélites de órbita terrestre baja LEO (Low-Earth Orbit) para comunicaciones satelitales, y enviar datos a través del módulo STINGR, esto con la finalidad de demostrar que la red de satélites Globalstar puede mejorar la comunicación en misiones de nanosatélites. Es importante mencionar que es la primera misión de NASA en colaboración con AEM.

Existen tres criterios de éxito en la misión del AzTechSat-1. El primer criterio de éxito es denominado Éxito Mínimo y consiste en entregar un CubeSat de vuelo al proveedor de lanzamiento; el segundo criterio es el Éxito Nominal el cual es el encargado de la liberación de un CubeSat de vuelo desde la Estación Espacial Internacional, en modo seguro; por último, el Éxito Integral, que consiste en la transmisión de datos por medio de la constelación de satélites de Globalstar.

El Concepto de Operaciones (conops) del AzTechSat-1 consiste en:

1. Lanzamiento del CubeSat,
2. Entrega del mismo a la Estación Espacial Internacional (EEI),
3. Liberación del CubeSat desde EEI,



4. Orbitar alrededor de la Tierra a una altitud entre 300 y 400 km,
5. Envío de paquetes de datos a la Estación Terrena,
6. Verificar comunicación con Globalstar,
7. Desorbitación y finalización de las comunicaciones.

El modelo del CubeSat AzTechSat-1 es presentado en la Figura 1.1.

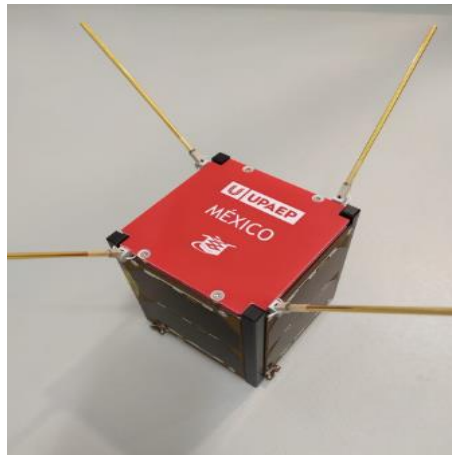


Figura. 1.1. Modelo de AzTechSat-1

1.2 SEGMENTO TERRESTRE DE AZTECHSAT-1

El Segmento Terrestre del nanosatélite es una parte fundamental en el desarrollo del proyecto, ya que se encarga de la comunicación directa entre el nanosatélite y la Tierra. El AztechSat-1 estará en la órbita LEO a 400 km de altura y transmitirá en la banda UHF (Ultra High Frequency) entre 435-438 MHz, de forma que su señal sea captada por la estación terrena localizada en UPAEP y los radioaficionados en territorio mexicano.

Las partes fundamentales que integran el Segmento Terrestre son: el transceptor, el rotor, la antena y el módulo de comunicación, en este caso el radio del satélite. El transceptor es el encargado de la modulación y demodulación de mensajes desde y hacia la estación terrena, y la computadora conectada al transceptor es la encargada de la codificación y decodificación de los



mensajes para lograr la recepción y la transmisión de datos. En la presente tesis se explica a detalle su implementación dentro del segmento terrestre.

El rotor es el encargado de orientar la antena para colocarla en línea de vista directa con el CubeSat cuando éste pase por territorio mexicano. Finalmente, el transceptor de vuelo, es un radio ubicado dentro del nanosatélite para lograr la comunicación exitosa con Tierra.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las comunicaciones juegan un papel fundamental en el desarrollo de un satélite. En el caso del AzTechSat-1 la misión principal es la comunicación simplex con la red de satélites GlobalStar, pero a su vez es necesario el enlace de comunicación del satélite con Tierra. Por este motivo surge la necesidad de implementar un transceptor en el segmento terrestre capaz de recibir y transmitir información para que el satélite sea telecomandado desde Tierra y así poder revisar el estatus del satélite cuando éste pase por México, ya que sin esa comunicación podría ponerse en riesgo la misión principal del satélite, debido a que no se podrían analizar los datos de los subsistemas que éste contiene.

1.4 OBJETIVO

Implementar el transceptor GS100 para la transmisión y recepción de datos entre el AzTechSat-1 y el Segmento Terrestre a una frecuencia de 437.3 MHz para el enlace descendente (downlink) y 435.4 MHz para el enlace ascendente (uplink), en modo de transmisión semidúplex mediante modulación GFSK y codificación mediante el protocolo ASM+Golay.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.

El presente proyecto consiste en la implementación del transceptor GS100 en el segmento terrestre localizado en UPAEP para permitir la comunicación con el CubeSat AztechSat-1. El enlace de comunicación se hará mediante la banda UHF (Ultra High Frequency) con un ancho



***IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1***

2

de banda entre 435-438 MHz en modo de transmisión semidúplex entre el satélite y la estación terrena. El modo de operación del AzTechSat-1 será telecomandado directamente desde la



estación terrena utilizando modulación digital GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) y el protocolo de capa de enlace de datos ASM+Golay. En este trabajo se enfatizará la utilización de transceptor GS100 y la computadora MS100 que harán posible la transmisión y recepción de datos entre el satélite y la estación terrena, logrando así la modulación y codificación de los mensajes a utilizar, es decir que el proyecto abarcará desde la recepción de señales, demodulación, y decodificación de los mensajes; o en su caso inverso la codificación, modulación y transmisión de los datos. Lo que no se abarca en el presente proyecto debido a que el segmento terrestre es grande será la definición de telecomandos, aunque sí se presentan para definir si las pruebas son exitosas; tampoco se incluye la automatización del rotor que dirigirá la antena.

1.6 FACTIBILIDAD DEL PROYECTO

El desarrollo del nanosatélite es un proyecto multidisciplinario realizado en UPAEP, por lo cual se cuenta con el equipo necesario localizado en las instalaciones del Laboratorio de Control y Robótica, y debido a que es un proyecto realizado en conjunto con NASA Y AEM es necesario que el Segmento Terrestre esté funcionando al momento del lanzamiento.

1.7 JUSTIFICACIÓN

Dentro de las funciones principales de un CubeSat es necesario contar con la capacidad de intercambiar información con una estación terrestre, dicha necesidad impulsa el desarrollo de tecnología de punta en el área de las telecomunicaciones dentro de las universidades, fomentando una educación de mayor calidad académica. Es por esta razón que para poder establecer una comunicación con el nanosatélite AzTechSat-1 desde tierra es necesario contar con un radio capaz de recibir y transmitir mensajes desde y hacia el CubeSat. Para lograr dicho propósito la implementación de un transceptor es requerida en el segmento terrestre, permitiendo el conocimiento del estatus del nanosatélite desde tierra y también logrando el envío de telecomandos hacia el mismo.



CAPÍTULO II

NANOSATÉLITES: CUBESAT

En los últimos años, el desarrollo de tecnología de tamaño reducido ha hecho posible la implementación de nanosatélites en el sector aeroespacial. Debido a su tamaño y a su potencia son mayormente utilizados para demostración en órbita de nuevas tecnologías y dispositivos. En 1999 se presentó el estándar CubeSat por parte las universidades: California Polytechnic State University (CalPoly) y la Universidad de Stanford. Su finalidad es orientar e involucrar a jóvenes estudiantes de las universidades en el desarrollo de proyectos del área aeroespacial. La ventaja principal del desarrollo de un CubeSat es su bajo costo, en comparación con otras misiones espaciales, además el volumen y flexibilidad con la que cuentan ayudan a poner en órbita una carga útil en un menor tiempo.

Los CubeSats tienen dimensiones estándar, es decir que miden 10 cm por arista y pesan menos de 1.33 kg, a este tipo de dimensión se le conoce como unidades (U), por lo que pueden ir de 1U a 6U [1]. En el caso del AzTechSat-1 su dimensión estándar es de 1U.

2.1 BREVE HISTORIA

El desarrollo de CubeSats ha impulsado en la actualidad a muchas universidades para desarrollar tecnología, fomentando en alumnos y profesores la investigación dentro del campo aeroespacial. La NASA generó desde el 2008 una iniciativa que proporciona oportunidades a los CubeSats para poder ser lanzados. A pesar de que esta iniciativa no ofrece garantías específicas, al menos es capaz de proporcionar un lanzamiento sostenible. Desde la creación de esta iniciativa, la necesidad de viajes compartidos de CubeSat ha aumentado drásticamente, debido a que cada día las universidades se han propuesto desarrollar más nanosatélites para sumergir a los estudiantes de diversas carreras en el área aeroespacial, además de fomentar la investigación.



La Iniciativa de Lanzamiento de CubeSat de la NASA [2] proporciona oportunidades de lanzamiento para pequeñas cargas útiles. Los CubeSat son volados en misiones previamente establecidas, es decir, que son cargas auxiliares. En el desarrollo de un CubeSat es importante seguir los requisitos de procedimiento de la NASA (NPR por sus siglas en inglés), por lo que la investigación debe abordar aspectos de la ciencia y la tecnología.

La iniciativa de ELaNa (Educational Launch of Nanosatellites), que en español quiere decir Lanzamiento Educativo de Nanosatélites, ayuda a la NASA a cumplir algunas de sus metas fundamentales como son: Fortalecer a la NASA y la futura fuerza laboral de la Nación; Atraer y retener a los estudiantes en ciencia, tecnología, ingeniería y disciplinas matemáticas (STEM); y atractivos americanos en la misión de la NASA [2].

2.2 OBJETIVO

El objetivo principal del desarrollo del programa de CubeSats es ayudar a las cargas útiles pequeñas a llegar al espacio. Además, los encargados de desarrollar un CubeSat deben asegurar la seguridad de la misión a través de buenas prácticas de ingeniería, pruebas, verificación y validación de los subsistemas del nanosatélite. También es importante que cada equipo documente todo lo relacionado a su subsistema, como requerimientos, diseño, equipos a utilizar, pruebas, etc. De esta manera, los integrantes del proyecto deben garantizar el funcionamiento de sus subsistemas para lograr una misión exitosa.

Además de lo anteriormente mencionado, el desarrollo de un nanosatélite brinda la posibilidad de abrir nuevos mercados basados en el espacio y así poder desarrollar industria espacial en lugares que aún no cuentan con ello.

2.3 ESPECIFICACIONES

En el momento de construir un CubeSat es importante conocer las especificaciones generales de este, para poder llevar a cabo una misión exitosa.

Entre las especificaciones generales mayormente conocidas se encuentran:



- Todas las partes del CubeSat deben permanecer unidas durante el lanzamiento, liberación y operación del mismo.
- Evitar la creación de residuos espaciales
- Los materiales del CubeSat deben satisfacer el criterio de baja emisión de gases para no contaminar otras naves espaciales.
- Los materiales del CubeSat deben tener una pérdida de masa total menor al 1%
- Es recomendable limitar el campo magnético afuera de la capa estática del CubeSat a 0.5 Gauss sobre el campo magnético de la Tierra.
- Los vehículos de lanzamiento cuentan con sus propias especificaciones. [3]

Para el equipo del segmento terrestre es importante considerar que para poder manejar una estación terrena los integrantes deben contar con licencia de radioaficionados otorgada por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT), la cual permite a los integrantes transmitir mensajes por radiofrecuencia (RF) con carácter específicamente personal, sin fines de lucro y sin realizar ninguna violación de las leyes. Además, se requiere el permiso para usar bandas de frecuencias amateur, el cual es otorgado por la Unión Internacional de Radioaficionados, cuyo nombre en inglés es International Amateur Radio Unión (IARU). Sin estos requisitos la operación de un segmento terrestre resultara imposible.

2.4 ÓRBITAS

Existen diferentes orbitas de acuerdo a la altura, forma, inclinación y dirección del movimiento del satélite. En la Tabla 2.1 se explica cada clasificación con el fin de entender un poco más cada una de ellas [4].



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

Tabla 2.1. Tipos de órbitas.



Por Altura	
Low Earth Orbit (LEO)	~<1500 km Velocidad del satélite muy alta, da la vuelta al planeta en aproximadamente 1 hr
Medium Earth Orbit (MEO)	8000-20000 km, órbita elíptica
High Earth Orbit (HEO)	~>20000 km
Geostationary Earth Orbit (GEO)	~36000 km, un solo satélite cubre 1/3 parte del planeta
Por Inclinación	
Ecuatorial	Inclinación=0
Inclinación	Baja
Inclinación Alta	Heliosíncrona (depende de la altura) i=96.3° @ 185 km i=99.1° @ 925 km
Polar	Inclinación ~90°
Inclinación Crítica	i=63.4°-directa i=116.6°-retrógrada
Por Forma	
Circular	
Elíptica	Molniya. HEO con inclinación crítica.
	Transferencia de Hohmann
	Otras
Parabólica	Trayectoria de escape marginal
Hiperbólica	Trayectoria de escape
Por dirección del movimiento del satélite	
Directa	El satélite se mueve hacia el oeste. Inclinación <90°
Retrógrada	El satélite se mueve hacia el oeste



Para el AzTechSat-1 la órbita es la LEO, y se ubicara a 400 km de altura, en la Figura 2.1, se aprecian las alturas orbitales de los satélites. En este caso al estar en la órbita LEO, el nanosatélite se ubicará en la región color verde.

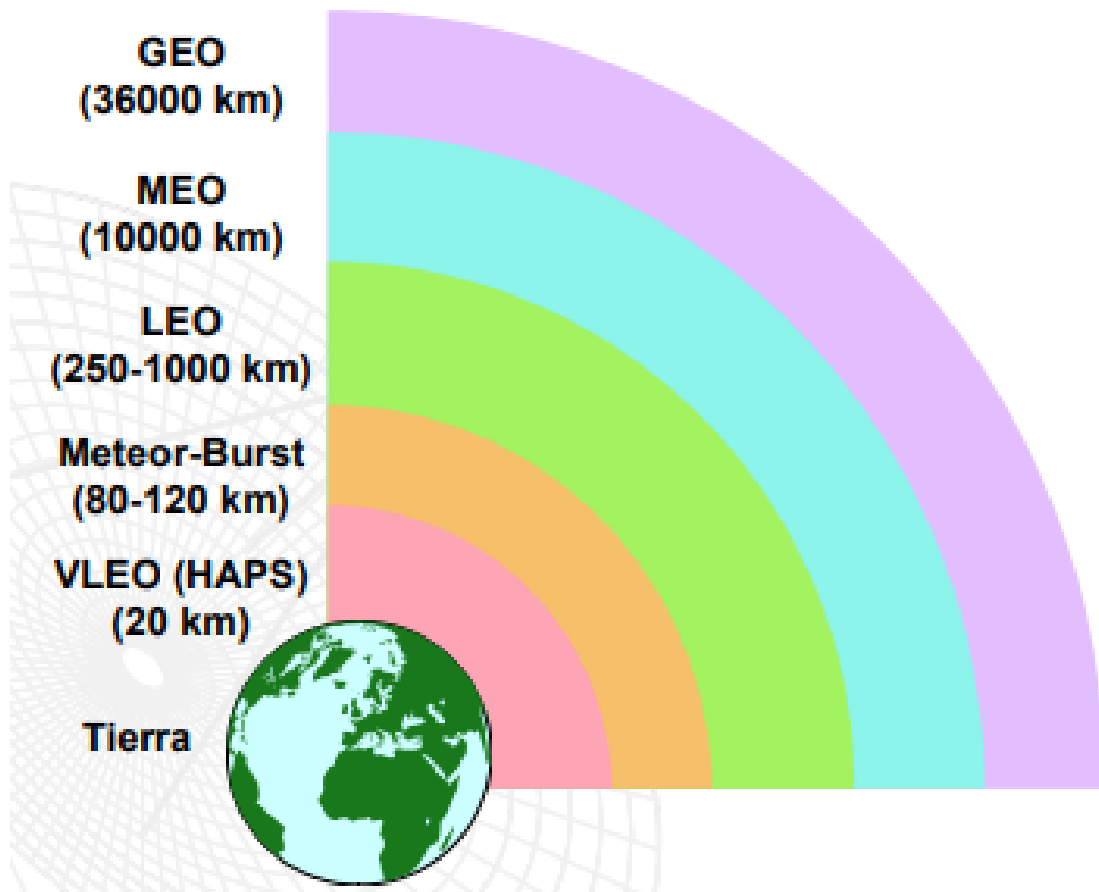


Figura 2.1. Alturas orbitales de los satélites. [Cori, 2012]



CAPÍTULO III

TEORÍA DE COMUNICACIONES

El contenido de este capítulo se enfoca en presentar los aspectos fundamentales de las comunicaciones electrónicas como lo son: modulación, frecuencias, efecto doppler, ondas electromagnéticas, protocolos de comunicación, entre otros. Para poder entender cómo es que dos sistemas se comunican y así poder comprender la recepción y transmisión de datos en un sistema.

3.1 UN POCO DE HISTORIA

La historia de las comunicaciones fue constituyéndose a lo largo de años, debido a que diferentes acontecimientos han sido parte fundamental en el entendimiento de la comunicación. En 1887 Heinrich Rudolph Hertz, un físico alemán, demostró que existían las ondas electromagnéticas y que éstas podrían ser usadas para enviar información a muy grandes distancias, por lo cual la unidad con las que son medidas las frecuencias del espectro llevan su apellido (Hertz o Hz). Años más tarde el italiano Guglielmo Marconi inventa la radio en 1901, tomando de base los conceptos demostrados por Hertz.

El desarrollo de las comunicaciones fue en aumento, y en 1973 Martin Cooper introduce el primer radioteléfono mientras trabajaba para la compañía Motorola, Cooper pionero en esta tecnología, se le considera como "el padre de la telefonía celular". Pero es hasta 1979 que nace el primer sistema comercial en Tokio, Japón desarrollado por la compañía NTT (Nippon Telegraph & Telephone Corp.), dos años más tarde en Estados Unidos surge también el primer sistema celular analógico comercial que trabajaba en la banda de los 800 MHz. En otros países ocurrió lo mismo y surgieron muchas tecnologías paralelas pero incompatibles entre sí [5].

En nuestros días aún se siguen desarrollando muchas tecnologías, en gran parte, gracias al uso de Internet y comunicaciones inalámbricas de mayor alcance como en el caso de la industria aeroespacial.

3.2 ONDA ELECTROMAGNÉTICA

La onda electromagnética es el fundamento de las comunicaciones, puesto que está compuesta de un campo eléctrico y un campo magnético. Ambos campos oscilan perpendicularmente uno del otro y la propagación de la onda también es perpendicular a ambos campos, como se muestra en la Figura 3.1.

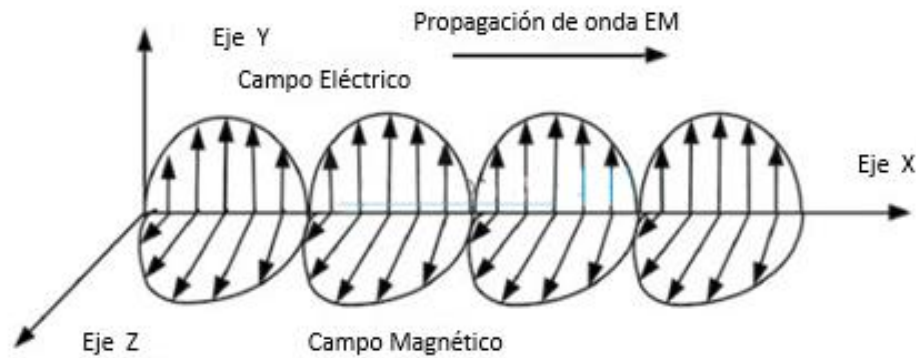


Figura 3.1. Representación de onda electromagnética

En la representación mostrada en la Fig. 3.1 el campo eléctrico actúa a través del eje Y, el campo magnético actúa a través del eje Z y la onda electromagnética se propaga a través del eje X.

Para comprender como es que una onda electromagnética sinusoidal se propaga a través de la distancia y el tiempo se presenta su ecuación y las partes que la conforman:

$$f(z, t) = A \cos[k(z - vt) + \delta] \quad (3.1)$$

En donde A = amplitud de onda, k = número de onda, v = velocidad de onda, δ = constante de fase.

También puede representarse como:

$$f(z, t) = A \cos(kz - \omega t + \delta) \quad (3.2)$$

En donde:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.3)$$



$$\omega = kv = 2\pi \frac{v}{\lambda} = 2\pi f \quad (3.4)$$

Donde λ = longitud de onda en m , ω = frecuencia angular en rad/s , y f = frecuencia en Hz [6].

Las características más importantes de una onda electromagnética son: la frecuencia y la longitud de onda.

La longitud de onda se utiliza para clasificar la radiación electromagnética en diferentes tipos, tales como ondas de radio, microondas, rayos x, luz visible, radiación infrarroja, rayos gama, radiación ultravioleta, véase la Figura 3.2.

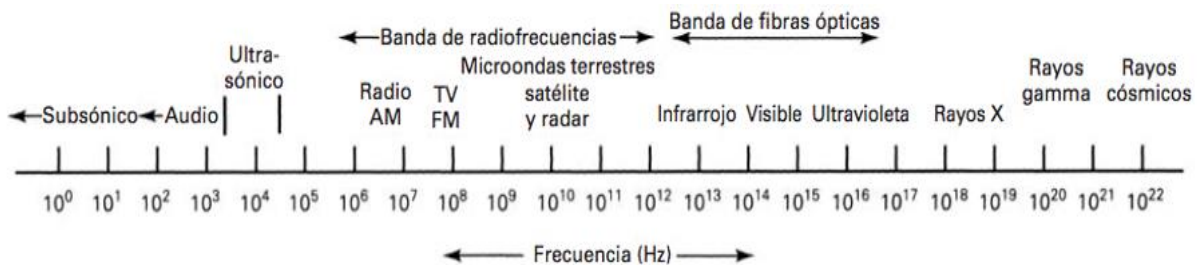


Figura 3.2. Espectro Electromagnético.

La definición teórica de frecuencia (f) es: El número de veces que se repite un ciclo de la onda en una unidad de tiempo.

La definición teórica de longitud de onda (λ) es: La distancia entre dos puntos idénticos de la onda en ciclos diferentes y adyacentes [6], como se muestra en la Figura 3.3.

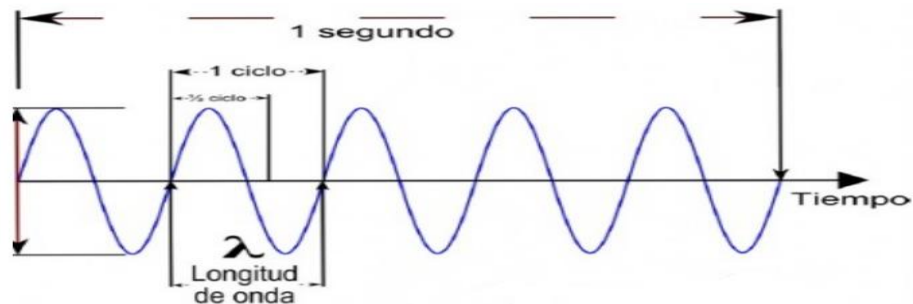


Figura 3.3. Representación de longitud de onda.

3.3 EFECTO DOPPLER

Cristian Doppler, un científico suizo del siglo XX estudió el fenómeno que hoy se conoce como Efecto Doppler, el cual consiste en que cuando una fuente de sonido y un oyente están en movimiento relativo la frecuencia del sonido que escucha el oído no es la misma que la frecuencia emitida por la fuente.

Existen diferentes casos para el efecto Doppler, dependiendo quién se mueve, es decir, si un oyente se mueve hacia una fuente de sonido estacionaria entonces escucha una frecuencia más alta que la frecuencia fuente, porque la rapidez relativa del oyente y la onda es mayor que la rapidez de la onda. En cambio, si la fuente es móvil y el oyente también, entonces las crestas de ondas emitidas por una fuente móvil se juntan por delante de la fuente (sonido agudo) y separan por detrás (sonido grave), es decir que la frecuencia es diferente [7]. En el caso de los objetos fuera de la Tierra, cuando éstos se acercan entonces la frecuencia “percibida” es mayor, pero en cambio sí se alejan la frecuencia “percibida” es menor. En la Figura 3.4 se describe gráficamente el efecto Doppler.

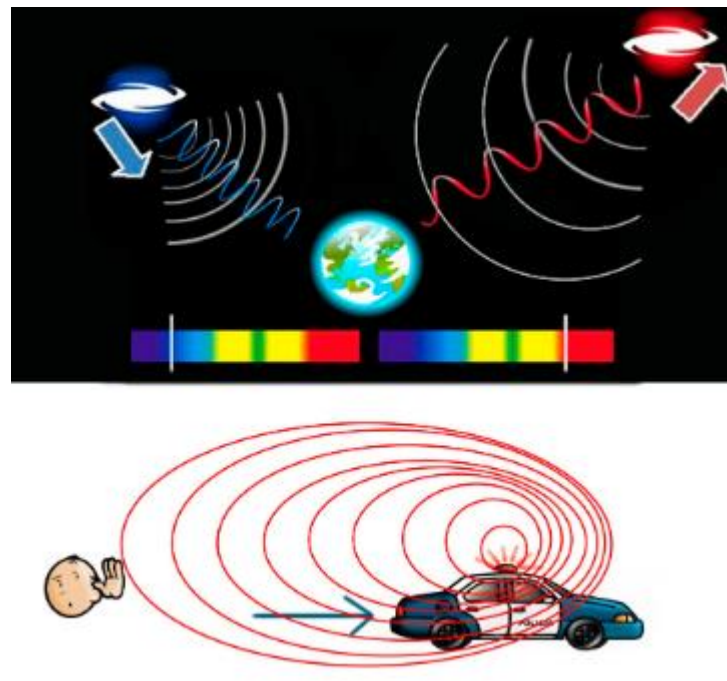


Figura 3.4. Efecto Doppler. [Torres, 2012]



3.4 BANDAS DE FRECUENCIAS

El espectro de frecuencias radioeléctricas es utilizado a través de todo el planeta para realizar comunicaciones, por lo cual la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas en inglés) tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite [8].

Tabla 3.1. Bandas de Frecuencia de acuerdo a ITU.

Bandas de Frecuencia				
Número de banda	Símbolos (inglés)	Gama de frecuencias (excluido el límite inferior, pero incluido el superior)	Subdivisión métrica correspondiente	Abreviaturas métricas para las bandas
3	ULF	300-3000 Hz	Ondas hectokilométricas	B.hkm
4	VLF	3-30 kHz	Ondas miriamétricas	B.Mam
5	LF	30-300 kHz	Ondas kilométricas	B.km
6	MF	300-3000 kHz	Ondas hectométricas	B.hm
7	HF	3-30 MHz	Ondas decamétricas	B.dam
8	VHF	30-300 MHz	Ondas métricas	B.m
9	UHF	300-3000 MHz	Ondas decimétricas	B.dm
10	SHF	3-30 GHz	Ondas centimétricas	B.cm
11	EHF	30-300 GHz	Ondas milimétricas	B.mm
12		300-3000 GHz	Ondas decimilimétricas	B.dmm
13		3-30 THz	Ondas centimilimétricas	B.cmm
14		30-300 THz	Ondas micrométricas	B.µm
15		300-3000 THz	Ondas decimicrométricas	B.dµm

Además de las bandas de frecuencias existen las gamas de frecuencias que no son únicamente para radiodifusión, las cuales se presentan en la Tabla 3.2.



Tabla 3.2. Gamas de Frecuencia.

Designación	Gamas de Frecuencias (MHz)		
	Región 1	Región 2	Región 3
I	47-68	54-68	47-68
II	87.5-108	88-108	87-108
III	174-230	174-216	174-230
IV	470-582	470-582	470-582
V	582-960	582-890	582-960

3.5 ELEMENTOS BÁSICOS DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICOS

Un sistema de comunicación se compone de tres elementos importantes: el transmisor, el canal y el receptor, los cuales cumplen a su vez una serie de pasos determinados para poder tener una comunicación exitosa, como se explica a continuación.

La transmisión funciona de la siguiente manera: La información contenida que se desea transmitir es codificada y posteriormente encriptada, luego es modulada y en algunos casos multiplexada. Posteriormente es enviada a través de un canal o medio. Después, en la parte de recepción la información es demultiplexada, demodulada, descryptada y decodificada por el receptor, para poder entender la información recibida. En la Figura 3.5 se muestra un diagrama del sistema de comunicación para poder comprender mejor la ruta que la información sigue para poder tener una comunicación exitosa.

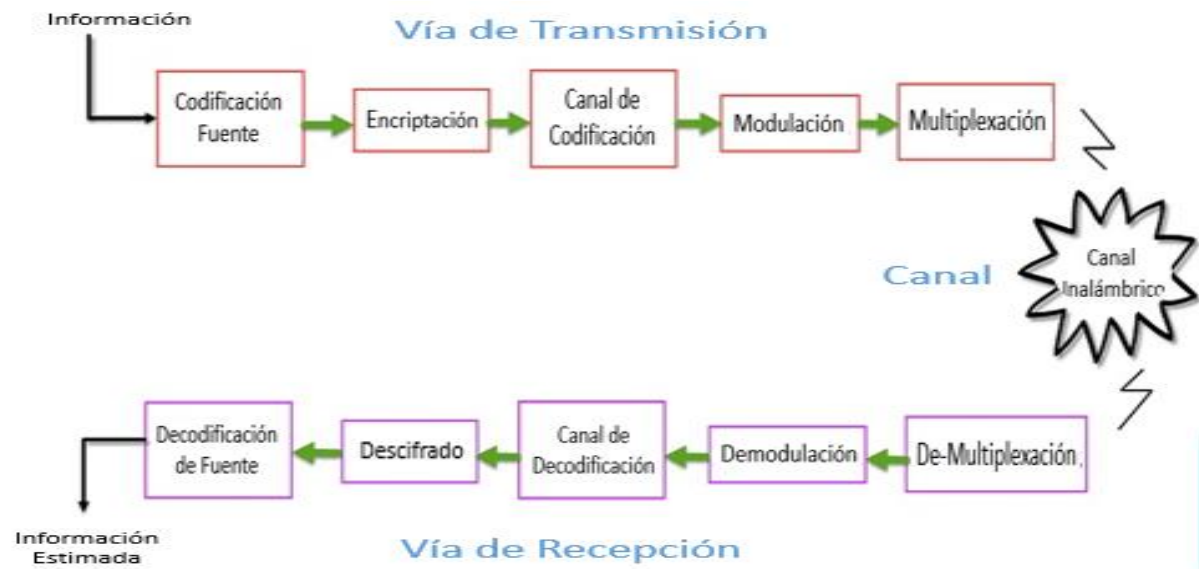


Figura 3.5. Sistema de comunicación inalámbrico.

Debido a que algunos conceptos pueden no resultar muy claros para el lector, se agregan en el glosario las definiciones de los conceptos anteriormente mencionados en el proceso de un sistema de comunicación.

3.6 TIPOS DE SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICOS

En la actualidad, gran parte de las comunicaciones en todo el mundo son inalámbricas. Esto resulta en un impacto muy grande a la tecnología, puesto que es importante desarrollar dispositivos capaces de mantener comunicación incluso cuando los usuarios se encuentren en sitios remotos y en movimiento. La capacidad de los servicios de comunicación debe ser tal, que permita transmitir información en formatos diferentes, es decir, transmitir desde mensajes de texto, de voz e incluso imágenes y videos.

Los tipos de comunicación inalámbrica más importantes y usados hoy en día son:

- radiodifusión



- comunicaciones satélites
- radar
- comunicación de telefonía móvil
- identificación de radiofrecuencia (rfid)

Entre otras.

Dentro de los tipos anteriormente mencionados, el radio puede considerarse como el primer servicio inalámbrico. Pero en nuestros días las comunicaciones satelitales son las de mayor impacto y desarrollo.

3.6.1 Frecuencias satelitales de uso comercial

Las comunicaciones satelitales hacen posible el desarrollo de las comunicaciones donde otros medios no pueden penetrar por su alto costo. Es decir que brindan acceso a áreas alejadas y de difícil acceso debido a la escasa infraestructura terrestre de comunicaciones (fibra óptica) en las zonas remotas. Por lo cual las comunicaciones satelitales ofrecen una gran oportunidad de servicios de comunicación que permiten transmitir voz, datos, imágenes, videos a velocidades en el orden de Megabits por segundo a través de todo el mundo.

Existen diferentes frecuencias de uso comercial para comunicaciones satelitales, las cuales se designan con símbolos literales, pero actualmente no existe una correspondencia normalizada entre las letras y las bandas de frecuencias, pues la misma letra puede designar varias bandas distintas en diferentes regiones geográficas. A continuación, se presentan en la Tabla 3.3 las bandas de frecuencia, la frecuencia y las aplicaciones de éstas, aunque para temas satelitales y de acuerdo a la ITU [8] es mejor nombrar a las bandas de frecuencia como en la Tabla 3.1.

Tabla 3.3. Bandas de Frecuencia con Símbolo Literal.

Banda	Enlace Subida/Bajada	Aplicaciones
V o Q	50/40 GHz	Datos a Altas velocidades



Ka	30/20 GHz	Datos y TV a Altas velocidades
Ku (BSS)	17/12 GHz	Video directo al hogar
Ku	14/11-12 GHz	VSAT, Video e Internet
C	6/4 GHz	Datos, voz y video
S	2/2 GHz	Servicios móviles de voz
L	1.6/1.5 GHz	Servicios móviles de voz

3.7 MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN

La modulación y demodulación son conceptos básicos e importantes para comprender como funciona un sistema de comunicación.

La modulación es una técnica donde el valor de cada muestra, la señal moduladora, cambia sistemáticamente las características de la señal portadora (la amplitud o la frecuencia). La onda modulada resultante “transporta” los datos. Por el contrario, la eliminación de la señal de la portadora da como resultado el retorno de la medición original.

En otras palabras, la modulación es el proceso de cambiar una o más propiedades de la señal portadora en proporción con la señal de la información o moduladora, de esta manera la señal portadora transporta la información a través del sistema y la señal de información modula a la portadora, cambiando su amplitud, frecuencia o fase [9]. En cambio, la demodulación es el proceso inverso, es decir que al demodular la señal se obtiene la portadora, teniendo así la información original. En la Figura 3.6 se presenta un diagrama básico de comunicación para entender la modulación.

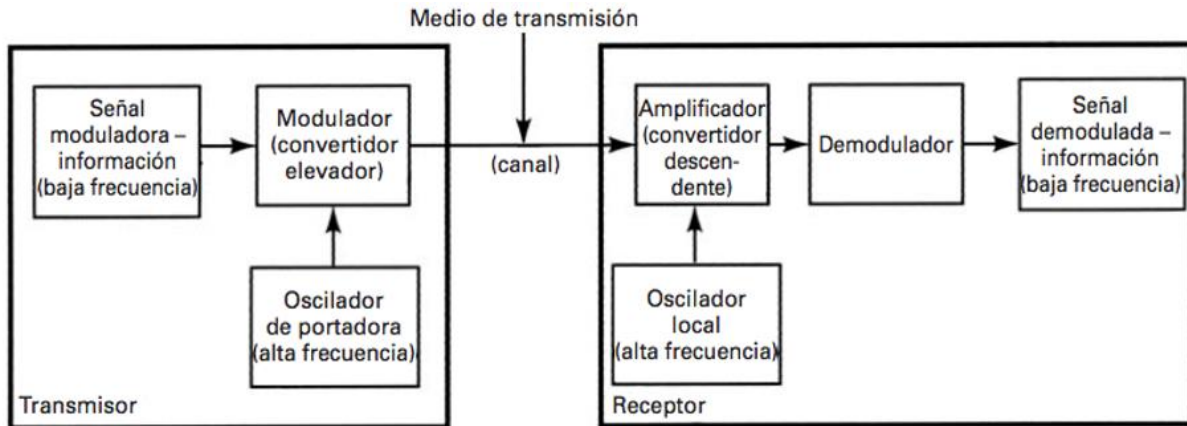


Figura 3.6. Diagrama del proceso de modulación-demodulación.

Dos conceptos muy importantes a considerar en la modulación son el ancho de banda y el coeficiente de modulación.

El **ancho de banda** es la diferencia entre las frecuencias máxima y mínima contenidas en la información, y el ancho de banda de un canal de comunicaciones es la diferencia entre las frecuencias máxima y mínima que pueden pasar por el canal (es decir, son su banda de paso).

El **coeficiente de modulación** describe la cantidad de cambio de amplitud (modulación) que hay en una forma de onda. En forma más específica, el coeficiente de modulación indica el cambio de amplitud de la onda de salida cuando sobre la portadora actúa una señal moduladora [8]. La definición matemática del coeficiente de modulación es:

$$m = \frac{E_m}{E_c} \quad (3.5)$$

En donde m =coeficiente de modulación (adimensional), E_m =cambio máximo de amplitud de la forma de onda de voltaje de salida (volts), E_c = amplitud máxima del voltaje de la portadora no modulada (volts).

3.7.1 Técnicas de Modulación

Existen diversas técnicas de modulación para transportar información, estas técnicas aprovechan mejor el canal de comunicación, lo que permite transportar más información de forma simultánea, protegiéndola de interferencias y ruidos.

En la Figura 3.7 se muestra un resumen de las diferentes técnicas de modulación.

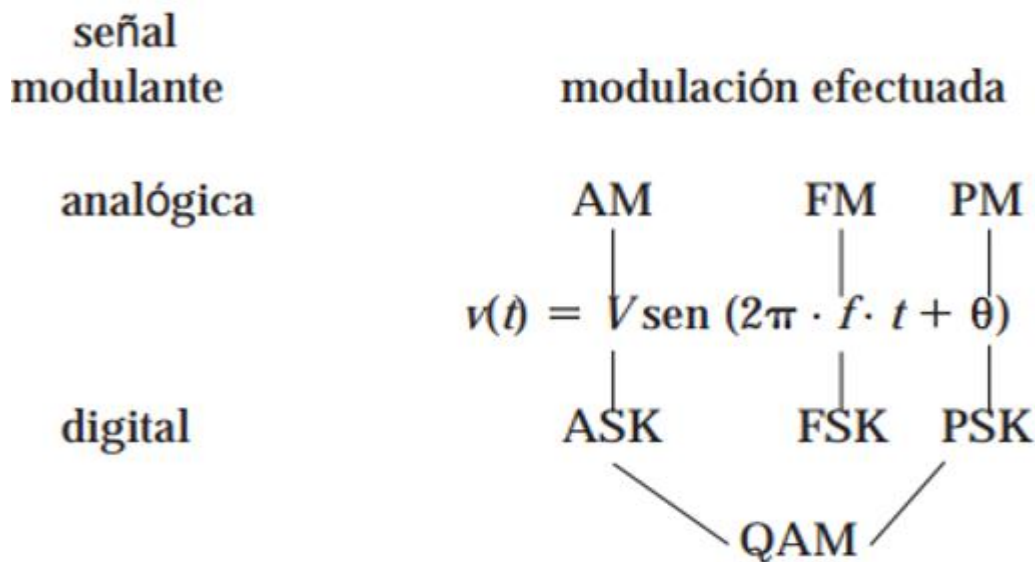


Figura 3.7. Técnicas de Modulación.

Como se aprecia en la figura anterior las técnicas de modulación se pueden dividir en analógicas y digitales, quizá las más conocidas son las analógicas, como lo son: AM, FM y PM. A continuación se explica cada una de ellas.

3.7.1.1 Modulación AM

La amplitud modulada (AM), como su nombre lo indica consiste en la variación de la amplitud de la señal portadora, manteniendo la misma frecuencia y fase. La onda de radiofrecuencia modulada es transmitida a alta potencia, mientras que los receptores reciben la señal con baja potencia. Esta señal se debe amplificar. La Figura 3.8 muestra la modulación AM [10].

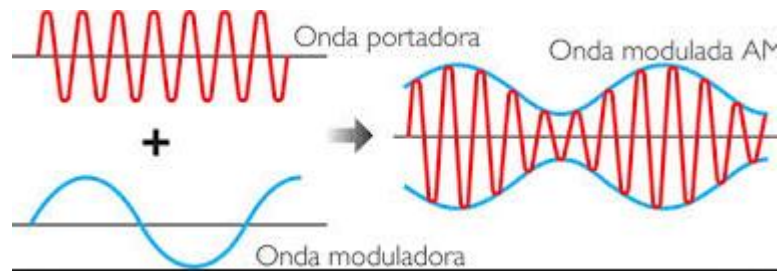


Figura 3.8. Amplitud Modulada AM.

3.7.1.2 Modulación FM

La frecuencia modulada (FM), como su nombre lo indica consiste en la variación de la frecuencia de la onda, manteniendo su amplitud y fase, es decir que la frecuencia de la señal modulada variará alrededor de la frecuencia de la señal portadora en función. y moduladora. En la Figura 3.9 se representa la Frecuencia Modulada [10].

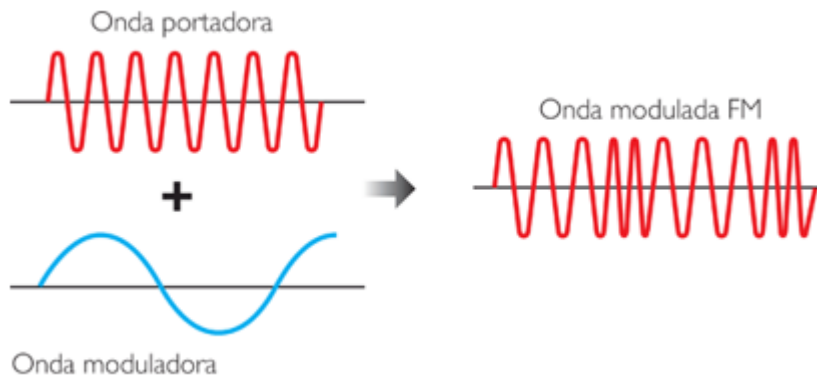


Figura 3.9. Frecuencia Modulada FM.

3.7.1.3 Modulación PM

La modulación de fase (PM), se refiere a la variación de la fase de la onda portadora proporcionalmente a la moduladora. Esta técnica de modulación no es muy utilizada, debido a que los equipos de recepción son más complejos, lo que lo hace más caro para los usuarios;



otro inconveniente es que puede existir ambigüedad en la fase de una señal, es decir que resulta

complicado saber si la fase es 0° o 180° . En la Figura 3.10 se muestra la representación de la modulación de fase [10].

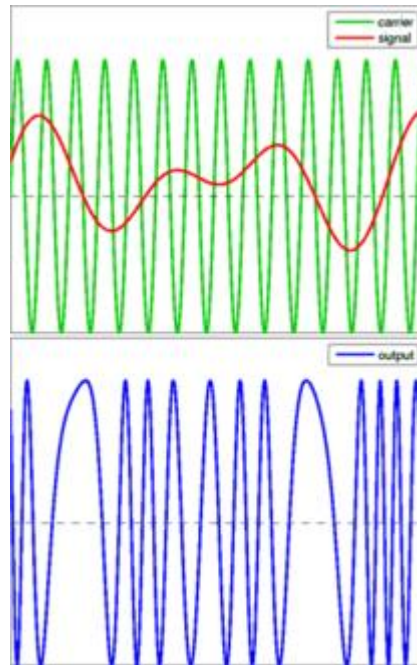


Figura 3.10. Modulación de fase.

Como se mencionó anteriormente existen técnicas de modulación digitales, las cuales se describen a continuación.

3.7.1.4 Modulación ASK

La modulación por desplazamiento de fase, ASK (Amplitude Shift Keying), representa la variación de amplitud de la portadora en función a los datos digitales a enviar. Los valores binarios se representan mediante dos amplitudes diferentes de la portadora. Entre sus principales características se encuentran: sensible a cambios repentinos de ganancia, se usa en fibras ópticas, se usa usualmente hasta 1200 bps en líneas de calidad telefónica. En la Figura 3.11 se presenta la modulación ASK [10].

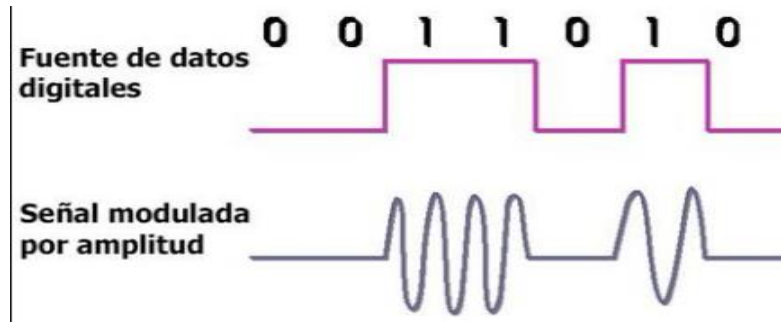


Figura 3.11. Modulación por desplazamiento de amplitud.

3.7.1.5 Modulación FSK

La modulación por desplazamiento en frecuencia, FSK (Frequency Shift Keying), es una técnica que utiliza dos frecuencias diferentes. La señal moduladora solo varía entre dos valores de tensión discretos formando un tren de pulsos donde un cero representa un "1" o "marca" y el otro representa el "0" o "espacio". Entre sus principales características se encuentran: menos sensible a errores que ASK, se utiliza típicamente a velocidades de hasta 1200 bps en líneas de calidad telefónica, transmisión de radio a frecuencias más altas, también se puede usar a frecuencias superiores en redes de área local que utilicen cable coaxial. En la Figura 3.12 se ilustra la modulación FSK [10].

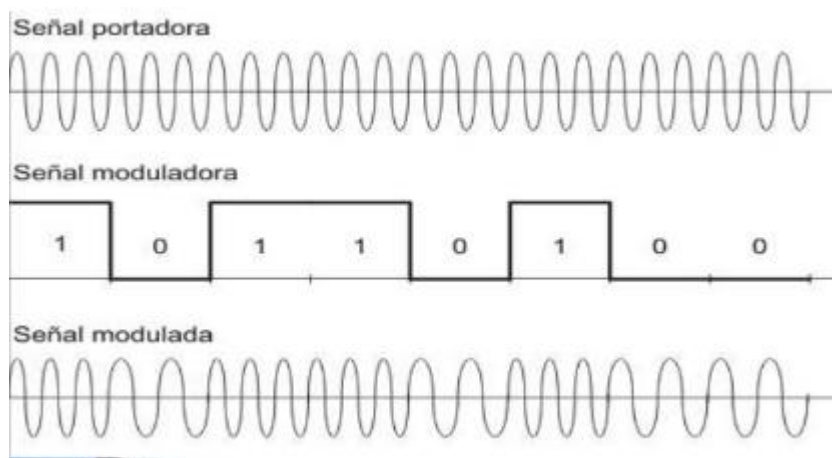


Figura 3.12. Modulación por desplazamiento en frecuencia.

3.7.1.6 Modulación PSK

La modulación por desplazamiento en fase, PSK (Phase Shift Keying), es una técnica de modulación que varía la fase de la portadora entre un número de valores discretos. La fase de la señal portadora se desplaza para representar los datos. Se caracteriza porque la fase de la onda portadora varía directamente de acuerdo con la amplitud de la señal moduladora, resultando una señal de modulación en fase, y se obtiene variando la fase de una señal portadora de amplitud constante en forma directamente proporcional a la amplitud de la señal modulante. En la Figura 3.13 se presenta la modulación PSK [10].

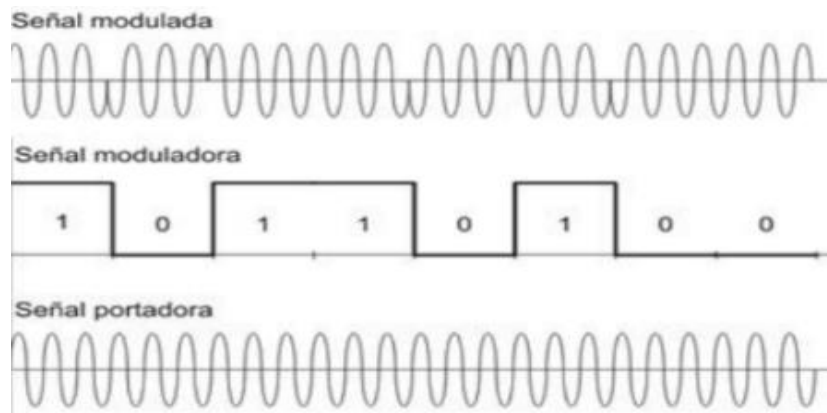


Figura 3.13. Modulación de Desplazamiento de Fase.

3.8 MODOS DE TRANSMISIÓN

Los sistemas de comunicaciones permiten manejar diferentes modos de transmisión, es decir, en un solo sentido, en ambos sentidos pero no al mismo tiempo y en ambos sentidos al mismo tiempo. Existen cuatro diferentes modos de transmisión los cuales se explican a continuación.

3.8.1 Modo Simplex

En el modo de transmisión simplex, la transmisión se realiza en una sola dirección. Por esta razón en muchos casos los sistemas de transmisión simplex también son conocidos como sistemas en un solo sentido, ya que es posible solamente recibir o transmitir datos.



El ejemplo más claro de transmisión simplex son las estaciones de radio y televisión, es decir que es posible recibir la señal emitida desde la estación, pero no es posible transmitir hacia ella.

En el caso del AzTechSat-1 el módulo utilizado para la misión principal, llamado STINGR (Figura 3.14) es un módulo de comunicación simplex, ya que estará enviando datos unidireccionales a través de la red simplex de satélites de Globalstar.



Figura 3.14. Módulo Simplex STINGR.

3.8.2 Modo Semidúplex

El modo de transmisión semidúplex, también conocido como Half Duplex (HDX) en inglés, o de cambio y fuera, permite establecer transmisiones en ambos sentidos, es decir que alternan entre transmisión y recepción. En otras palabras, una estación puede transmitir y recibir, pero nunca al mismo tiempo.

Un ejemplo claro de transmisión semidúplex es un walkie talkie, ya que utiliza botones PTT (Push To Talk) para hablar y poder conectar con sus receptores. Otro ejemplo claro son las estaciones de radio de la banda civil, marítima y de policía, así como también en el AzTechSat-1 la Estación Terrena (Figura 3.15), la cual es capaz de transmitir mensajes hacia el satélite y cuando éste envíe hacia Tierra, la estación es capaz de recibir mensajes sin transmitir ningún comando.



Figura 3.15. Estación Terrena, Módulo Semidúplex.

3.8.3 Modo Dúplex Total

El modo de transmisión dúplex total o Full Duplex (FDX) es uno de los modos de transmisión más completos, puesto que permite transmitir en ambos sentidos. En algunas ocasiones también son conocidos como simultáneos de dos direcciones o líneas bilaterales.

Existen algunas limitantes en este modo de transmisión, ya que, aunque sean capaces de transmitir y recibir en ambas direcciones al mismo tiempo, la estación a la que se transmite debe ser la misma que se recibe. El ejemplo más popular son los sistemas telefónicos como se muestran en la Figura 3.16, en donde se pueden realizar llamadas telefónicas y estar recibiendo y transmitiendo mensajes al mismo tiempo, pero hacia los mismos dispositivos.



Figura 3.16. Celulares, Módulos Dúplex total.

3.8.4 Modo Dúplex Total/General

El último modo de transmisión es el dúplex total/general, también conocido como Full/Full Duplex (F/FDX). Quizá es el modo de transmisión más completo, puesto que permite transmitir y recibir mensajes en forma simultánea, pero no necesariamente entre las mismas dos estaciones. Esto quiere decir que una estación puede estar transmitiendo hacia una segunda, e incluso tercera y cuarta estaciones diferentes.

El ejemplo más común de este modo de transmisión es en circuitos de comunicaciones de datos como se muestra en la Figura 3.17, en donde se aprecia el logo de Skype, el cual es un software que permite comunicaciones de texto, llamadas y video llamadas, en las cuales es posible conectarse con más de dos personas al mismo tiempo.



Figura 3.17. Modo Dúplex Total/General



CAPÍTULO IV

TEORÍA DE COMUNICACIÓN DEL NANOSATÉLITE

El Segmento Terrestre del nanosatélite AzTechSat-1 tiene como objetivos la implementación e integración del transceptor NanoCom AX100 en comunicación Half Dúplex con otros subsistemas del nanosatélite, y además la implementación de la antena y rotor operando correctamente. Aunado a lo anterior, se planea transmitir “tokens” en las frecuencias establecidas (entre 435-438 MHz) para que los radioaficionados puedan decodificarlo y obtener una tarjeta QSL emitida por UPAEP.

En éste capítulo se presenta la teoría de la comunicación del nanosatélite, es decir que se explicará el protocolo Cubesat Space Protocol (CSP), el protocolo ASM+Golay y la modulación GFSK, ya que su uso resulta indispensable para la comunicación del nanosatélite con Tierra.

4.1 Protocolo de satélites Cubesat

El Protocolo de satélites Cubesat, CubeSat Space (CSP), fue desarrollado por estudiantes de la Universidad de Aalborg en el 2008. El protocolo fue tan bueno que pronto llegó a ser integrado en los productos de la empresa GomSpace. En un principio la abreviatura CSP hacía referencia a CAN Space Protocol, pero debido a que la capa física cubre también el enlace espacial, RS232 e I2C se optó por el nombre de CubeSat Space Protocol, usando las mismas siglas [11].

La terminología de red usada por CSP es similar a la de Internet y al modelo TCP/IP. Puede ser configurada por diferentes topologías, pero lo común es crear dos segmentos, es decir, crear un segmento para la estación terrena y otro para el CubeSat. En la Figura 4.1 se muestra la topología utilizada en el CSP.

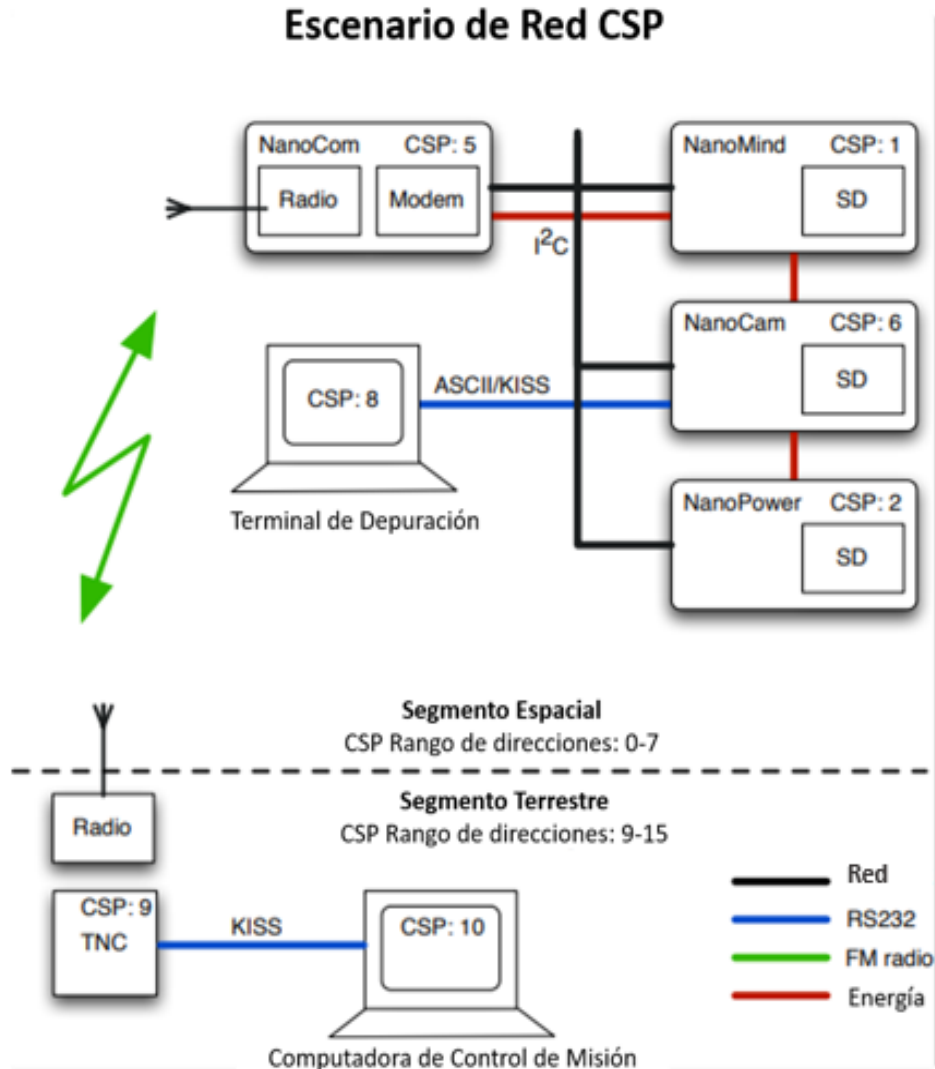


Figura 4.1. Escenario de red CSP

Como se aprecia en la Figura 4.1, el rango de direcciones va del 0 al 15, las cuales se dividen por igual para dar lugar a la comunicación en el segmento espacial y en el segmento terrestre, lo cual permite facilitar el enrutamiento de red. Es decir que las direcciones CSP del 0-7 son utilizadas para el segmento espacial, y las direcciones CSP del 9-15 son utilizadas en el Segmento Terrestre.



Una de las principales ventajas de utilizar CSP es que debido al uso de tablas de enrutamiento estáticas programadas en el código fuente de los subsistemas, se puede hacer cualquier configuración. Además, debido a que el nodo 8 tiene una configuración especial, es posible conectar la terminal de depuración a cualquier subsistema y a su vez seguir usando CSP para la comunicación. De esta manera es posible hacer pruebas para cualquier subsistema sin necesidad de tener el satélite en completo funcionamiento. Además de eso, gracias a las tablas de enrutamiento, es posible realizar una comunicación más certera e incluso más puntual hacia donde debe viajar la información.

Los objetivos técnicos del uso de CSP son: permitir una topología de red orientada a servicios que extiende una red de forma transparente a través de segmentos espaciales y terrestres, Facilidad de integración entre subsistemas. Además, es importante destacar que cuenta con una compatibilidad para diferentes sistemas operativos como: FreeRTOS, POSIX; Arquitecturas como: ARM, AVR8, AVR32, x86 e Interfaces como: I2C, CAN, RS-232, CCSDS, HDLC. Finalmente, el protocolo CSP es útil para el AzTechSat-1 debido a que es utilizado en todos los sistemas de GomSpace y posee partes principales de código abierto (código de Google) lo que fomenta la colaboración. Por estas razones el CSP es fundamental en la implementación del Transceptor GS100.

4.2 PROTOCOLO ASM+Golay

El protocolo ASM+Golay (Attached Sync Marker) es un protocolo utilizado en el NanoCom AX100 para decodificar/codificar el mensaje recibido/transmitido. Este protocolo es el modo 5 en el módulo AX100. En este modo, el módulo RF busca una palabra ASM única de 32-bit en el flujo de bits, si más de 28 de los 32 bits coinciden se considera una coincidencia. Si esto ocurre, el siguiente campo es un campo Golay de 3 bytes. Este campo contiene 12 bits de longitud y 12 bits FEC (Forward Error Correction) +paridad, lo que ayuda a corregir hasta tres biterrores en el campo longitud. Todas estas características proporcionan una amplia certeza de trama y longitud válidas. Es decir, que en el extremo caso de que se presenten demasiados



biterrores en el campo longitud, la probabilidad de recibir una trama dañada es casi nula, puesto que las comprobaciones de error FEC/CRC fallarán y no permitirán recibir una trama obsoleta.

La desventaja principal de ocupar este protocolo es el tiempo de procesamiento adicional requerido para verificar el campo Golay, pero ha sido controlado mediante el uso más eficiente de interrupciones, un controlador SPI acelerado por hardware y la detección de palabras de sincronización de descarga con un correlador de hardware para el primer frame en una transmisión. Esto significa que la AX100 no consume más energía en reposo que en el modo 2. Cuando se recibe una estructura o frame, el uso de Reed-Solomon FEC corrige los errores de bits en el campo de datos. La aleatorización CCSDS es necesaria cuando se utiliza este modo, sin embargo, no hay codificación de hardware realizada por el módulo de radiofrecuencia (RF) [12].

En la Figura 4.2 se presenta el diseño del marco o frame Golay. El cifrado es de tipo NRZ, sin codificar (se recomienda la aleatorización CCSDS), con el primer bit más significativo.

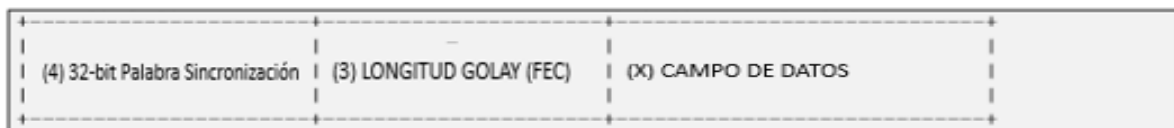


Figura 4.2. Diseño del marco Golay

La carga útil se codifica opcionalmente con el código Reed-Solomon CCSDS (255,223). Esto se hace generalmente en la mayoría de los satélites. La palabra clave utilizada en los modos ASM y ASM + Golay es la misma (0x930B51DE). Resumiendo, se eligió el protocolo conocido como ASM para la capa de enlace de datos para el enmarcado porque se pueden utilizar hasta 240 bytes en el campo de datos. GOLAY se utiliza para proteger la integridad del campo de longitud, ya que realiza la corrección de errores de avance. HMAC se utiliza para verificar la integridad de la transmisión. CCSDS se utiliza para la aleatorización. Se crearon “handshakes” personalizados para corregir errores de bits de paquetes y tramas,



usando CRC-32 y Reed-Solomon. El control autónomo de la radio satelital fue desarrollado para garantizar la fiabilidad



del enlace después de un restablecimiento, en modo seguro o después de una falla al iniciar el enlace con la estación terrena.

4.3 DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ERRORES

Independientemente del modo de enmarcado que se utilice, la capa de enlace de datos del AX100 admite las siguientes modificaciones adicionales al campo de datos:

- `csp_crc`: suma de comprobación CRC32 de 4 bytes a las tramas.
- `csp_rs`: código de bloque de 32 bytes Reed-Solomon (223, 255)
- `csp_rand`: aleatorización CCSDS del marco
- `csp_hmac`: HMAC a nivel del marco

Estas características se aplican para la transmisión en el siguiente orden: HMAC-CRC-Reed Solomon FEC-Aleatorización. Se recomienda usar siempre la aleatorización, el reed solomon y el HMAC o el CRC. Para el enlace ascendente tiene sentido usar HMAC para la seguridad. Para el enlace descendente tiene sentido usar CRC sólo por simplicidad [12].

4.3.1 Validación del marco CRC32

El modo CRC32 se utiliza para añadir una comprobación de redundancia cíclica de 32 bits a cada trama saliente, es decir que es una simple comprobación para detectar cualquier bit-flips en el marco. El polinomio utilizado es CRC-32C [12].

4.3.2 Codificación Reed Solomon

El codificador RS (223.255) es capaz de corregir hasta 16 bytes por trama. También proporciona detección de errores, así que los marcos o tramas dañadas se descartan. Aunque existe una desventaja de esta codificación, que consiste en su gran sobrecarga y que permanece constante

incluso para tramas más pequeñas, es preferiblemente utilizada para verificar que el mensaje es correcto.

4.3.3 Aleatorización CCSDS

El Comité Consultivo de Sistemas de Datos Espaciales (CCSDS) es una organización de carácter oficial establecido por la dirección de sus miembros. El Comité se reúne periódicamente para abordar los problemas de los sistemas de datos que son comunes para todos los participantes, y formular soluciones técnicas sólidas a estos problemas. Los resultados de las acciones del Comité se denominan Normas Recomendadas y no son consideradas vinculantes para ninguna Agencia.

La Figura 4.3 muestra la relación entre los modelos de referencia de interconexión, en donde la subcapa de sincronización y codificación de canal proporciona las funciones adicionales necesarias para la transferencia de tramas a través de un enlace espacial. Estas funciones son: codificación/decodificación de control de errores, delimitación/sincronización de tramas de transferencia y generación/eliminación de transiciones de bits [13].



Figura 4.3. Relación con las capas de OSI.



Para poder asegurar longitudes de ejecución bajas tanto de 1 como de 0 en el flujo transmitido, los datos pueden ser aleatorizados por medio del xor'ing con una secuencia pre compartida. La secuencia pseudoaleatoria utilizada se basa en el polinomio recomendado por la CCSDS:

$$h(x) = x^8 + x^7 + x^5 + x^3 + 1 \quad (4.1)$$

4.3.4 Autenticación de mensajes basada en Hash (HMAC)

La principal funcionalidad del HMAC es que sólo aceptará paquetes de transmisores que tengan el parámetro `csp_hmac_key` correspondiente. Esto es útil para proteger a un satélite de paquetes de enlace ascendente enviados desde estaciones terrestres no autorizadas.

4.4 MODULACIÓN GFSK

La modulación por desplazamiento de frecuencia gaussiana (GFSK) es un método de modulación para la comunicación digital que se encuentra en muchos estándares como Bluetooth, DECT y Wavenis. La comunicación digital consiste en traducir los símbolos de un alfabeto discreto en una señal que el lado transmisor puede enviar a un medio de transmisión y del que el lado receptor puede recuperar los símbolos originales, el alfabeto tiene sólo dos símbolos 0 y 1 (bits). Donde un 1 lógico es representado mediante una desviación positiva (incremento) de la frecuencia de la onda portadora, y un 0 mediante una desviación negativa (decremento) de la misma. La señal de salida de ésta modulación es:

$$\delta(t) = A \cos(2\pi f(t) + \phi) \quad (4.2)$$

En dónde A =Amplitud de la señal portadora, f =Frecuencia de la señal portadora, $\phi(t)$ =Fase de la señal portadora.

El método de modulación es una variante de la modulación de frecuencia (FM) de algunas frecuencias portadoras. La modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) transmite información disminuyendo la frecuencia portadora para la duración de un símbolo 0 y



aumentando la frecuencia para la duración de un símbolo 1 como se mencionó anteriormente. A la entrada del modulador se aplica un filtrado pasa-bajos gaussiano para suavizar las transiciones de la señal de datos y evitando así posibles interferencias entre símbolos, lo que da como resultado la modulación GFSK. En un sistema de la vida real, las señales que viajan entre antenas tienen una frecuencia portadora muy alta, la llamada frecuencia del radio, como es el caso de la estación terrena. Normalmente se utilizan circuitos analógicos para la conversión ascendente a RF en el transmisor y la conversión descendente a IF en el receptor. Un convertidor analógico-digital (ADC) en el lado del receptor, devuelve la señal al dominio digital [14]. En la Figura 4.4 se observa la modulación GFSK.

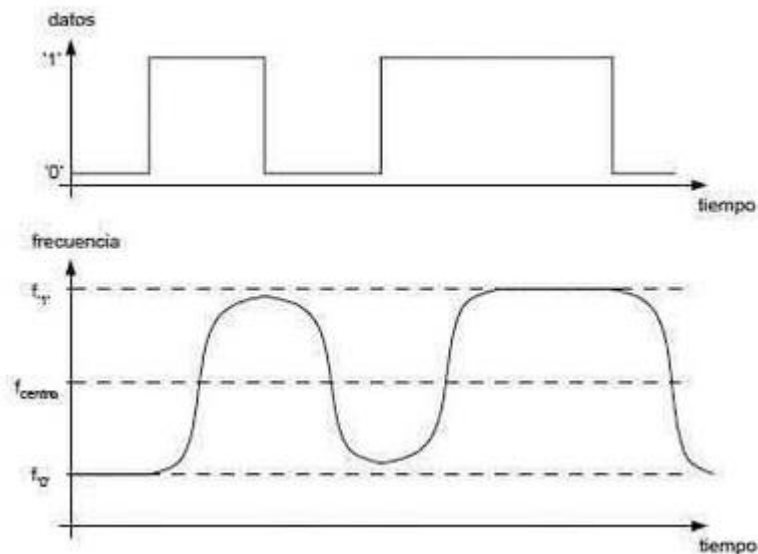


Figura 4.4. Modulación GFSK



CAPÍTULO V

ELEMENTOS DEL SEGMENTO TERRESTRE

En este capítulo se describen los diferentes elementos utilizados en el segmento terrestre y de una manera particular algunos elementos de comunicación localizados en el CubeSat, para comprender cómo es que la comunicación es posible, además de que tanto el AzTechSat-1 como la estación terrena cuentan con un radio de las mismas características, lo que aumenta en mayor medida las posibilidades de alcanzar una comunicación exitosa, y disminuye el tiempo de implementación y el riesgo de mensajes erróneos. En la primera parte se explican los elementos ubicados en el nanosatélite y posteriormente los elementos ubicados en Tierra. En caso de requerir información más específica es necesario consultar el manual del equipo.

5.1 VISIÓN GENERAL DEL MÓDULO UHF NANOCOM AX100

El módulo de enlace ascendente y descendente UHF es responsable de enviar y recibir telemetría y comandos de la carga útil. Para el caso de la estación terrena ubicada en UPAEP y para el CubeSat AzTechSat-1 se ha decidido comprar un módulo de comunicación existente para facilitar el enlace de comunicación entre el nanosatélite y Tierra. El módulo escogido es el NanoCom AX100 de la empresa GomSpace.

El módulo NanoCom AX100 es un transceptor de largo alcance semidúplex VHF/UHF configurable por software, que combina el uso de filtros digitales, con FEC (Forward Error Correction) y AFC (Control Automático de Frecuencia) para proporcionar un sistema de alta sensibilidad, pero flexible en su manejo. Las especificaciones técnicas del módulo de comunicación vienen dadas por proveedor en su manual de usuario.



El módulo AX100 posee un control inteligente de acceso al medio CSMA/CA (escuchar antes de hablar) combinado con una pequeña duración de conmutación RX/TX que proporciona un corto tiempo de pulso satelital, eliminando la necesidad de radios full-duplex, incluso para la descarga de grandes volúmenes de datos. Además, los parámetros del módulo RF son totalmente configurables en órbita. Por ejemplo, la frecuencia portadora, las anchuras de banda de los filtros, la velocidad en baudios, la trama, etc. pueden modificarse en cualquier momento. A su vez, esto simplifica el diseño del satélite, ya que sólo se necesita una antena para completar la comunicación.

Es importante destacar que el módulo NanoComAX100 es el radio utilizado en el CubeSat, pero la estación terrena, en este caso el transceptor GS100 posee el mismo radio, demostrando así que la capacidad de comunicación entre el nanosatélite y Tierra es mayormente posible.

El módulo es presentado en la Figura 5.1.

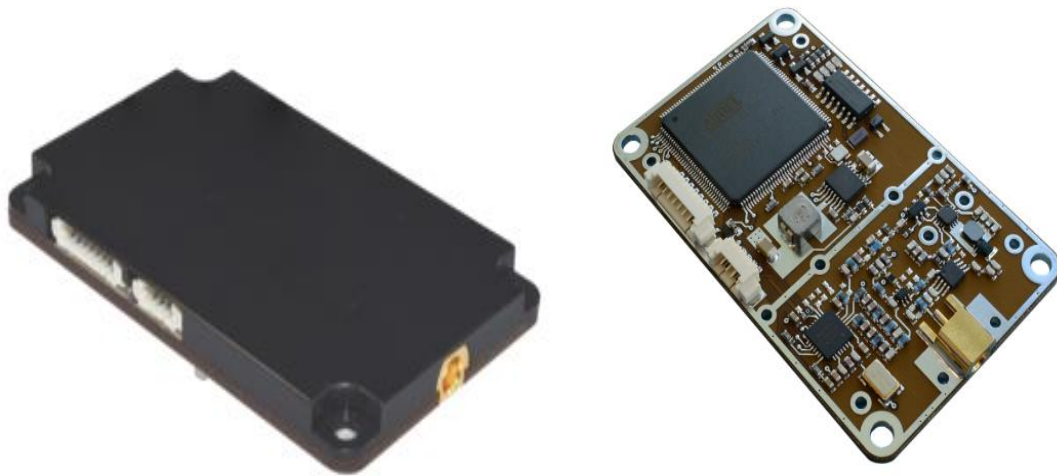


Figura 5.1. NanoCom AX100 (AX100).



5.1.1 Parámetros básicos de NanoCom AX100

Las especificaciones técnicas del módulo AX100 son las presentadas en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Especificaciones técnicas NanoCom AX100

Parámetros técnicos NanoComAX100	
Banda	VHF/UHF
Ancho de banda	50-500 KHz
Modulación	FSK/MSK/GFSK/GMSK
Data rate	0.1-115.2 kbps
Sensibilidad	-137 dBm a 100 bps con FEC
Desviación programable de la frecuencia de la portadora y de la señal FSK	Intervalos de 1 Hz
Control Automático de Frecuencia	AFC
Transmisor	potencia de salida ajustable de 24 a 30 dBm con > 45 % PAE
Encapsulación del frame	<ul style="list-style-type: none">➤ ASM de 32 bits + campo de longitud variable Golay.➤ HDLC y AX.25 disponibles para sistemas heredados.➤ HDLC con r 1/2 k=7 codificación viterbi.➤ AX.25.



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

Opciones de enmarcado	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reed Solomon FEC (223,255). ➤ CRC32. ➤ Aleatorización de CCSDS. ➤ HMAC (autenticación).
Interfaces de Datos.	CSP, I2C, UART, CAN-Bus
Reloj	RTC
Temperatura de funcionamiento	-30°C a +85°C
Dimensiones	65 mm x 40 mm x 6.5 mm
Masa	24.5 gramos
Material PCB	Vidrio/Poliamida 4+4 doble pila ESA ECSS-Q-ST-70-11-C.

Además de las especificaciones antes mencionadas, el AX100 se caracteriza por contar con una protección ajustable contra sobrecalentamiento, también tiene un convertidor de alta eficiencia para la alimentación de transmisores. Su factor de forma compacto de placa hija ayuda a que ésta sea compatible con la placa madre GomSpace CubeSat. También cuenta con un conector de una sola pieza FSI de 20 posiciones, chapado en oro duro. Posee una interfaz de consola UART para un uso sencillo en la configuración del laboratorio, además tiene un conector de antena MCX, un disipador de calor integrado (también funciona como pantalla EMI) y un conjunto IPC-A-610 Clase 3.

5.1.2 Diagrama de bloques del módulo AX100

El AX100 consta de tres partes: receptor, transmisor y bloque de procesamiento. Los primeros dos son dispositivos heterodinos básicos y el último es el encargado de procesar los datos de



entrada/salida para su lectura/escritura desde I2C. El microcontrolador tiene tres conexiones de bus satelital: I2C, CAN-Bus o USART. Además, tiene un USART separado para la consola de depuración GOSH, finalmente el conector RF es un único SMA de 50 Ω tanto para RX como para TX. Su diagrama se muestra en la Figura 5.2.

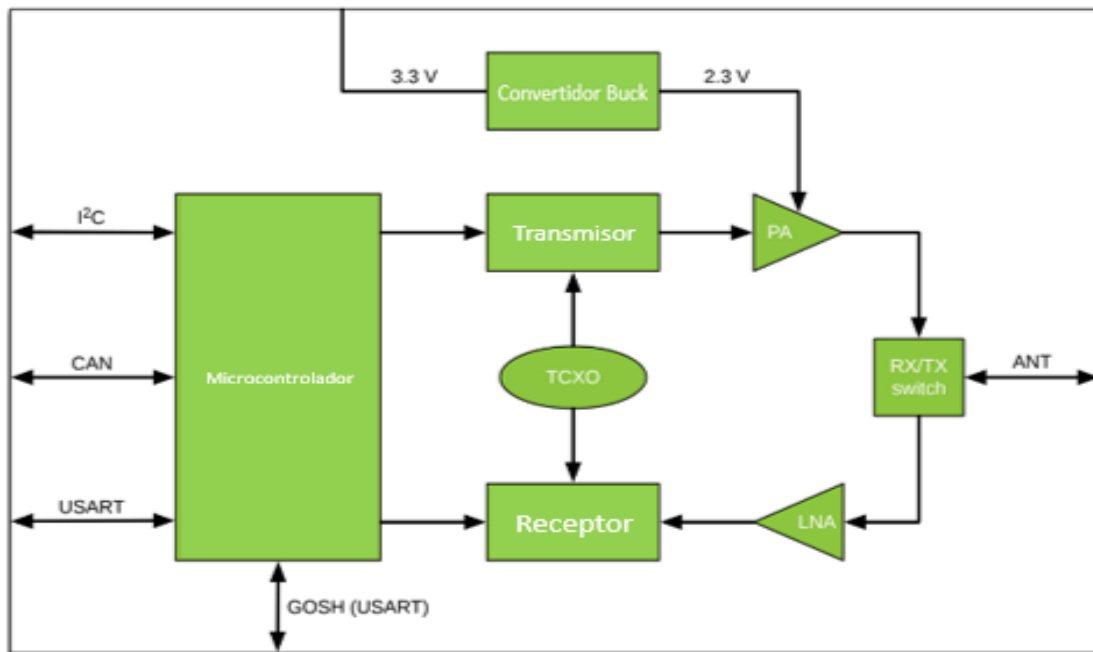


Figura 5.2. Diagrama de Bloques Funcional de NanoCom AX100.

5.1.3 Interfaces de entrada/salida del AX100.

El módulo AX100 es un dispositivo sensible a descargas electrostáticas (ESD), especialmente en las siguientes interfaces: Conector RF para todos los pines de E/S de la CPU, por lo cual se deben observar las precauciones adecuadas durante la manipulación del dispositivo dadas por el fabricante.

El módulo NanoCom AX100 utiliza el Protocolo Espacial CubeSat (CSP) para transferir datos a través de los nodos del bus principal del sistema y así intercomunicar los subsistemas individuales dentro del nanosatélite y también hacia la estación terrena. El módulo se conecta



en el AzTechSat-1 al conector apilado PC-104 a través de los pines destinados a él para el manejo de I2C. El protocolo de capa de red CSP abarca múltiples protocolos de capa de enlace de datos, como KISS, I2C y Can Fragmentation Protocol (CFP).

El módulo se conecta a una antena mediante conectores SMA. La impedancia de los conectores y líneas es 50Ω .

5.2 ANTENA NANOCOM ANT430

La antena NanoCom ANT430, es la antena ubicada en el CubeSat, y aunque es un elemento externo a la estación terrena es muy importante conocerla ya que influye de manera directa en la comunicación entre el nanosatélite y Tierra.

La antena elegida para el AzTechSat-1 es una antena estándar, en este caso la antena NanoCom ANT430 de GomSpace fue la elegida, debido a la compatibilidad entre sus componentes al ser desarrollados por la misma empresa. Otro factor importante para la elección recae en el hecho de que la longitud de las antenas para ciertas frecuencias supera las dimensiones de un CubeSat, por esta razón se eligió un sistema de antenas desplegable, permitiendo el acomodo de las mismas a través de la estructura fija del nanosatélite. En la Figura 5.3 se presenta el sistema de antenas desplegable.



Figura 5.3. Sistema de antenas desplegable NanoCom ANT430.

El sistema de antenas desplegable consiste en cuatro antenas monopolo combinadas en una red de fase para formar una sola antena con polarización circular. El diagrama de antena es casi omnidireccional y no hay puntos ciegos que puedan causar desvanecimiento con los satélites en movimiento. Las antenas son compatibles con las estructuras de otros fabricantes y pueden montarse tanto en el panel superior como en el inferior del nanosatélite. La placa de circuito impreso de la antena está diseñada para ser lo menos obstructiva posible para cualquier carga útil o paneles montados en la parte superior o inferior. Tiene un perfil bajo que permite montar un panel solar en la parte superior, y también cuenta con un orificio de gran diámetro en el centro para colocar algún otro dispositivo como una lente de cámara o algo similar.

5.2.1 Parámetros básicos de NanoCom ANT430

Los parámetros del sistema de antenas desplegables se listan en la Tabla 5.2.



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

Tabla 5.2. Parámetros del sistema de antenas desplegadas NanoCom ANT430

Parámetro	Requisito	Mínimo	Tipo	Máximo	Unidad
Impedancia RF	Desplegado		50		Ω
Potencia de entrada RF				10	W
VSWR en el punto de ajuste	Antenas individuales		1.1	1.15	
VSWR en el punto de alimentación			1.2	1.3	
Perdida de inserción del sistema de antenas	435 MHz	0.7	1	1.6	dB
Rango de frecuencias		400	435	550	MHz
Ancho de banda	435 MHz		5		MHz
Rango de temperatura		-55		100	$^{\circ}\text{C}$

En la Figura 5.4, se presentan las dimensiones físicas de ANT430. La masa total estimada con barras de aluminio es de 30 g, y cada barra de antena individual tiene un peso de 1,5 g.



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCÉPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

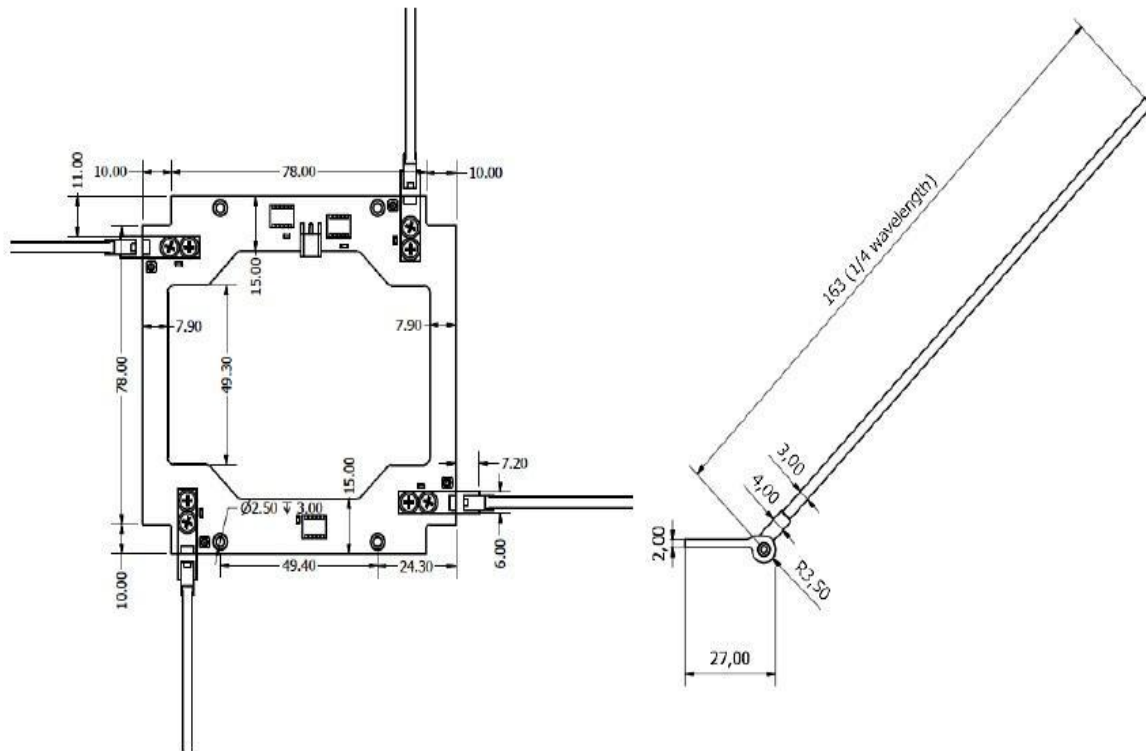


Figura 5.4. Dimensiones físicas de NanoCom ANT430.

El funcionamiento del despliegue de las antenas se realiza mediante cuerdas dyneema que se queman con corriente continua en pocos segundos para liberar el mecanismo de despliegue. Los cuatro elementos de antena se montan individualmente en bisagras con resortes de torsión que, cuando se sueltan, giran los elementos de antena a un ángulo de 45 grados por encima de la placa de circuito impreso. El resorte sólo se tensa hasta aproximadamente la mitad de su capacidad de seguridad en modo estiba, por lo que es seguro mantener las antenas estibadas indefinidamente sin afectar el despliegue fiable. Todo el sistema de despliegue de antenas es uno de los más críticos, por lo que sus subsistemas están duplicados, también es necesario para duplicar líneas de comunicación y cables quemados. De acuerdo con esto, tiene dos

direcciones y si no hay confirmación después del primer intento de revelar las antenas, existe
la posibilidad



de conectarse al módulo a través de otra dirección. Es importante mencionar que las pruebas para el despliegue de antenas son limitadas, puesto que la corriente continua con la que son quemados los cables es suministrada por el NanoPower P31u y debido a que éste es la batería del nanosatélite no puede estar siendo expuesto a llegar al límite de su capacidad.

Debido a que las dimensiones de un CubeSat de 1U son limitadas, las antenas del ANT430 deben ser adaptadas y cortadas físicamente, lo cual repercute directamente en la ganancia de la antena, aunque no de una manera considerable, puesto que la pérdida registrada es de un 10% comparada con la original.

5.3 COMPUTADORA DE LA ESTACIÓN TERRENA Y SOFTWARE PARA CONTROLAR EL SATÉLITE

El NanoCom MS100 es una computadora de la empresa GomSpace, lo que permite una conexión fácil y eficaz entre componentes y además facilita el método de comunicación entre la Tierra y el nanosatélite. En términos técnicos el MS100 es una PC que está diseñado para funcionar como parte de la configuración de una estación terrena, junto con un transceptor y una antena de techo. El software en la computadora incluye:

- Linux OS
- Controlador de Rotor (para GomSpace NanoCom AS100 y AS200)
- Csp-doppler
- Csp-term
- SDK de mando y gestión MS100
- Opción de compra para la librería de misión MS100
- Opción de compra para GSWeb



En la Figura 5.5 se muestra la parte frontal de la computadora NanoCom MS100, cuyo procesador es un Intel Xeon E3-1220 3 GHZ, 500 GB SSD, 4 GB RAM. Está equipado con dos puertos USB y un DVD.



Figura 5.5. Panel frontal del NanoCom MS100.

La parte posterior tiene dos puertos Ethernet con velocidad de transferencia de 1 Gbps para el acceso a la red y un conector de pantalla VGA en la parte posterior. La tensión de alimentación es de 220 V AC (50-60 Hz), permitiendo una instalación rápida del equipo. En la Figura 5.6 se aprecia la parte posterior del MS100.

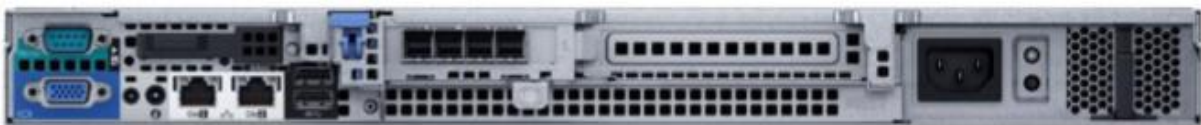


Figura 5.6. Parte posterior del NanoCom MS100

5.4 TRANSEPTOR NANOCOM GS100

El transceptor NanoCom GS100 (Figura 5.7) es un dispositivo diseñado por GomSpace como alternativa y solución para la implementación de una estación terrena capaz de establecer comunicación con el módulo NanoCom AX100.



Figura 5.7. Transceptor NanoCom GS100.

Debido a que tanto el nanosatélite como NanoCom GS100 utilizan la radio AX100 para recibir y transmitir, el rendimiento es óptimo y el riesgo de pérdidas de implementación es mínimo. Además al trabajar con este equipo se logra un control total de la radio de la estación terrestre y la eliminación de la necesidad de costosos transceptores FM/USB y soluciones TNC de hardware/software personalizadas.

El GS100 es una unidad montada en rack de 19" que contiene dos módulos de radio AX100 no aptos para vuelo, colocados en una placa de soporte especial como se muestra en la Figura 5.8. Hay tres versiones disponibles, con diferentes rangos de frecuencia: VHF 145 MHz, UHF 400 MHz, UHF y 435 MHz. En este caso se utilizará para la banda UHF a 435 MHz.

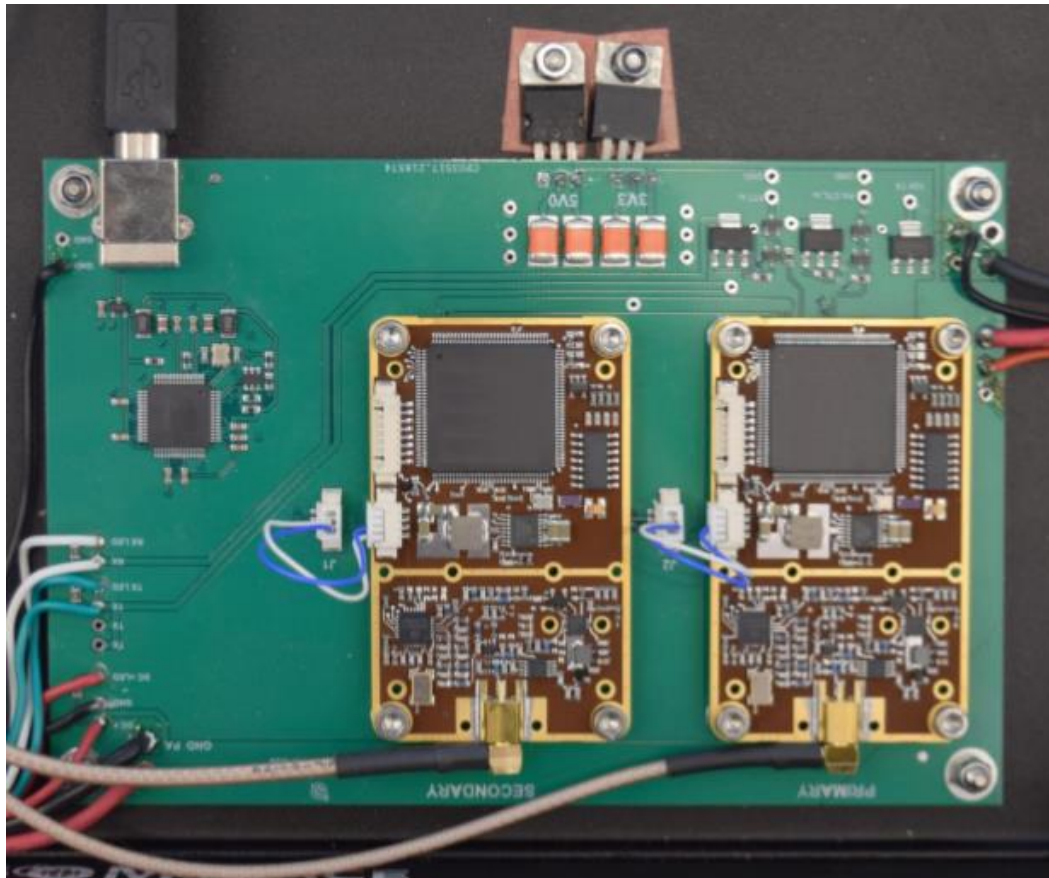


Figura 5.8. Placa con dos AX100 montados.

La ventaja principal de utilizar este equipo es que al estar utilizando el mismo componente tanto en el nanosatélite como en Tierra la configuración del software puede utilizarse para controlar tanto al satélite como a la estación terrena. Además, ambos módulos responden al protocolo CSP (CubeSat Space Protocol), lo que significa una disminución en tiempo de implementación, así como también facilita la comunicación al tener el mismo formato de configuración en los mensajes.

El GS100 está diseñado para controlar su rotor y antena de la misma empresa, pero para el AzTechSat-1 se cuenta con un rotor y antena de otra marca que permiten tener una estación terrena completa capaz de comunicarse con el nanosatélite.



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCÉPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

53

En la parte frontal del GS100 (Figura 5.9) se aprecian 3 LED's. el primero es azul e indica si esta encendido, el segundo es verde e indica si se está recibiendo (RX), y el último es rojo e indica si está transmitiendo (TX).



Figura 5.9. Parte frontal de NanoCom GS100

En la parte posterior del GS100 (Figura 5.10) se aprecian diversas conexiones, la primera de izquierda a derecha es para el suministro de energía que debe ser 12 V, 6 A con un conector KPJX-PM4S. Luego se ve un puerto USB tipo B para conectarlo a la computadora, también tiene incorporado un convertidor FTDI USB a serie, que proporciona cuatro puertos serie a la computadora de la estación terrena. Estos puertos están mapeados de la siguiente manera: TTYUSB0: Interfaz de radio primaria CSP/KISS, TTYUSB1: Serie de radio primaria/Interfaz GOSH, TTYUSB2: Radio secundaria Interfaz CSP/KISS, TTYUSB3: Serie de radio secundaria/Interfaz GOSH. Todas las interfaces son de 500.000 baudios, 8n1. También se aprecian los dos conectores RF tipo N para la antena primaria y la antena secundaria. Es importante que mencionar que el AX100 primario es utilizado para esta misión, puesto que es el único que puede enviar y recibir mensajes, por su parte el secundario solo es capaz de recibir. Por último, se aprecia la conexión de un analizador de espectro para la estimación de la desviación de frecuencia.



Figura 5.10. Parte posterior de NanoCom GS100



5.4.1 Parámetros básicos del Transceptor NanoCom GS100

Las especificaciones técnicas del GS100 son las presentadas en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Especificaciones técnicas NanoCom GS100

Parámetros técnicos NanoComGS100					
Banda	VHF/UHF				
Módulos de radio AX100	2 (sin clasificación para vuelo), uno primario y otro secundario				
Amplificador de potencia interno	25 W				
Interfaces	USB a USART Quad FTDI, dos interfaces de línea de comandos (GOSH), dos interfaces CSP/KISS				
Dimensión	Rack 19"				
Condiciones Máximas Absolutas					
Símbolo	Descripción	Mínimo	Máximo	Unidad	
V_{sup}	Tensión de alimentación		12.5	V	
P_i	Potencia máxima absoluta de entrada en la entrada del receptor		-10	dBm	
T_{amb}	Temperatura de funcionamiento	20	40	°C	
T_{stg}	Temperatura de almacenamiento	-20	80	°C	
VSVR	Carga de salida VSWR		10:1		
Características Eléctricas					
Símbolo	Descripción	Mínimo	Tipo	Máximo	Unidad
V_{sup}	Tensión de alimentación	6	12	12.5	V
I_{sup}	Corriente de alimentación	4	5		A



Además de las especificaciones antes mencionadas, el GS100 se caracteriza por tener un control de misión centralizado y seguimiento Doppler, así como también ofrecer compatibilidad con red de estaciones terrestres y salida para el analizador de espectros. A su vez posee LED's indicadores de encendido/RX/TX. La exposición a las condiciones máximas absolutas de calificación durante períodos prolongados puede afectar a la fiabilidad e incluso descomponer el equipo.

5.4.2 Diagrama de bloques del NanoCom GS100

El GS100 contiene 2 módulos AX100 no clasificados para vuelo, además contiene un amplificador de potencia con un interruptor de temperatura para los ventiladores. También cuenta con un USB para acceso al software, dos conectores de antena y un conmutador RF/TX. La señal de recepción está disponible como accesible en la salida del analizador de espectro. En la Figura 5.11 se presenta el diagrama de bloques del GS100.

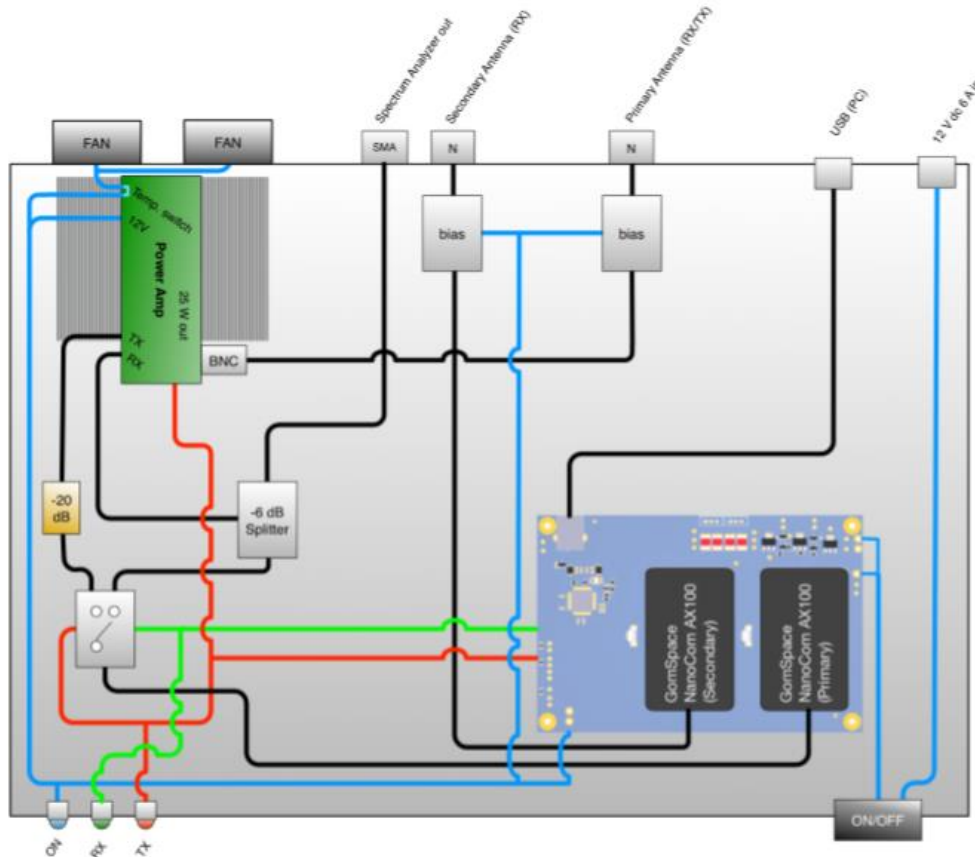


Figura 5.11. Diagrama de Bloques Funcional de NanoCom GS100.

5.5 CONTROL DEL ROTOR

En una estación terrena es indispensable el uso de un rotor para poder posicionar la antena de la estación de acuerdo con las coordenadas del satélite dadas por el equipo Ciencia y Tecnología del proyecto AztechSat-1, para poder establecer una línea de visión entre la antena de Tierra y la del satélite y de esta manera lograr una comunicación exitosa.

5.5.1 Interfaz del controlador del rotor YAESU-232B

La interfaz del controlador del rotor Yaesu GS-232B proporciona un control digital del rotor ya que tiene su propio microprocesador PIC18C452 con ROM, RAM y convertidor analógico-digital de 10 bits, además puede ser configurado a 1200 o 9600 baudios.



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

57

Para la conexión es necesario un conector DB-9 macho para conectar en modo serial al RS232C de la computadora. En este punto es importante mencionar que la computadora utilizada para el control del rotor es una computadora diferente a la utilizada para el transceptor.

En la Figura 5.12 se aprecia el controlador del rotor, el cual está integrado de cable de control para el rotor de azimut (5 in a mini DIN), cable de control para el rotor de azimut/elevación (cable dual de 5 pines a DIN), cable de alimentación de CC y cinta auto adherente.



Figura 5.12. Controlador del Rotor YAESU-232 B.

5.5.2 Rotor YAESU G-5500

El rotor Yaesu G-5500 proporciona un control de azimut de 450° y de elevación de 180° (Figura 5.13) para arreglos de antenas unidireccionales de satélite, de tamaño mediano y grande, bajo control remoto desde la posición de operación de la estación.

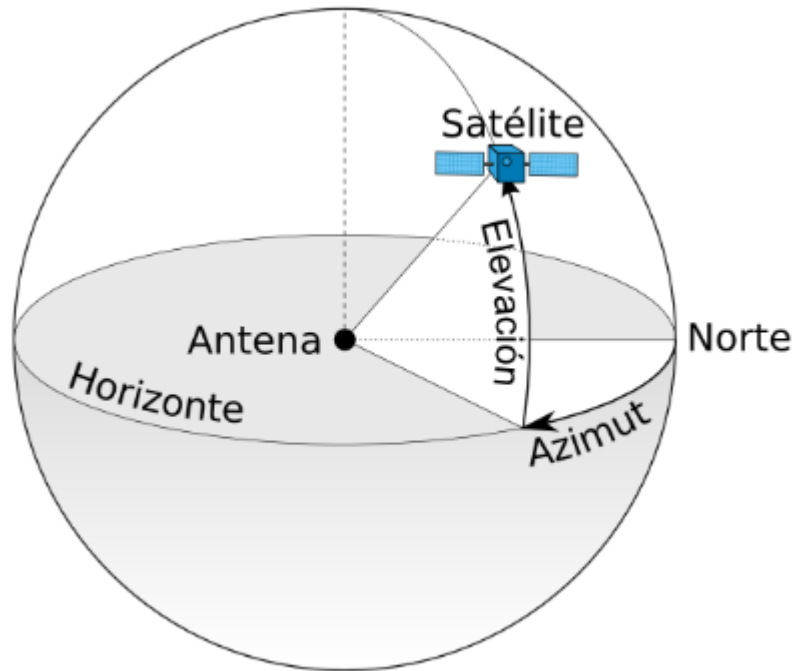


Figura 5.13. Azimut y Elevación

Los materiales del rotor al ser aluminio fundido a presión recubierto de resina de melanina dan resistencia al agua y proporcionan el correcto funcionamiento del mismo bajo cualquier condición climática. El rotor se puede montar junto a un mástil, o de forma independiente con rotador azimutal dentro de una torre y el rotador de elevación.

En la Figura 5.14 se aprecia el controlador del rotador cuyos medidores indican el azimut en dirección de la brújula y grados, y la elevación de 0° a 180° . Además, cuenta con un conector D-a-A de controlador externo para una pantalla o microordenador.



Figura 5.14. Yaesu G-5500 Rotor.

Es preciso mencionar que para monitorear el estado del rotor G-5500, se instaló una cámara IP POE Power Over Ethernet, la cual es una cámara Hikvision de 2 megapíxeles, que además utiliza un NVR 8 MEGAPIXEL de 4 vías IP y 4 puertos POE. La ventaja de utilizar este tipo de cámaras es que es posible alimentarlas de manera remota a través de un cable y también es posible conectarse a ellas a través de Internet Explorer.

5.6 ANTENA 436CP42UG

La antena 436CP42UG establece un nuevo estándar de rendimiento para antenas circulares polarizadas en UHF. El patrón extremadamente limpio maximiza la ganancia conocida como Front to Back (F/B), la cual se refiere a cuánto más débil llega una señal en la parte posterior de la antena en comparación con la parte delantera. El patrón generado por la antena es importante para igualar la temperatura de ruido de la antena con los modernos preamplificadores de bajo ruido.

Los elementos de la barra de 3/16" 6061-T6 están centrados en la barra principal para minimizar la interacción y mantener una baja elipticidad. Los aisladores están estabilizados contra los rayos UV y bloqueados en su lugar con retenedores de acero inoxidable. La sección central de la barra



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

60

es de 1-1/2" de diámetro, afilada, delantera y trasera, a través de secciones de 1-1/4" a extremos de 1".

La antena tiene un rango de frecuencia de 430 a 438 MHz. Las conexiones internas están incrustadas en un gel de silicona de grado espacial que sella la humedad y mejora el manejo de la potencia. En la Figura 5.15 se presenta la antena montada para la estación terrena en UPAEP.



Figura 5.15. Antena 436CP42UG montada en UPAEP



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSECTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

61

5.6.1 Especificaciones de Antena 436CP42UG

Las especificaciones técnicas de la antena 436CP42UG son presentadas en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Especificaciones técnicas Antena 436CP42UG

Parámetros técnicos Antena 436CP42UG	
Modelo	436CP42UG
Rango de Frecuencia	430 a 438 MHz
Ganancia	18.9 dBic *restar 2.14 de dBi para dBd
F/B (Front to back, de adelante hacia atrás)	25 dB típico
Elipticidad	1.5 db típico
Ancho de Haz	21° circular
Tipo de alimentación	Dipolo plegado
Impedancia de alimentación	50 Ω desbalanceado
VSWR Máximo	1.5:1
Conector de entrada	Hembra Tipo N
Manejo de potencia	1Kw (.5kW w/POL SW1)
Longitud/diámetro de barra	18' 10" / 1-1/2" a 1"
Longitud máxima del elemento	13-1/4"
Radio de giro	95"
Distancia de acumulación	68" alto y 68" ancho
Tamaño del mástil	1-1/2" a 2" Nom.
Superficie eólica/Durabilidad	2 Sq. Ft./100 MPH



5.6.2 Cable RG8U para transmisión por radiofrecuencia.

El cable coaxial RG8U es utilizado para conectar la antena al módulo GS100 que contiene al transceptor. Sus principales características son: conductor de cobre desnudo sólido de 10 AWG de 0.108", aislamiento de polietileno semisólido, Duo bond II® + trenza de cobre estañado (90% de cobertura), cubierta de PVC. Además, para el cable RG8U se utiliza un conector macho tipo N con una impedancia de 50 Ω . Es importante que tenga la misma impedancia que la indicada en el AX100, ya que al ser éste nuestro transceptor se deben evitar daños en el sistema. En la Figura 5.16 se muestra el cable RG8U.



Figura 5.16. Cable coaxial RG8U.

5.7 PREAMPLIFICADOR SP-70

El uso de un preamplificador en una estación terrena es indispensable al momento de recibir mensajes, puesto que debe proporcionar el menor ruido posible para que el mensaje sea de mejor calidad, y para eso es recomendable utilizar un preamplificador de bajo ruido.



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

63

El SP-70 es un preamplificador de bajo ruido que funciona para las frecuencias de 430-440 MHz. Además, ofrece ganancia ajustable y buena respuesta de una señal grande. El uso de un preamplificador en el sistema es fundamental para disminuir el ruido provocado por pérdidas de cable y enchufe hasta 1 dB en la recepción. Una de las ventajas principales que ofrece el preamplificador SP-70 es que se puede apagar incluso al recibir, si se trata de sobrecargar el receptor con señales de entrada muy fuertes. Con una potencia de transmisión baja de hasta 50 W, la conmutación de transmisión/recepción puede realizarse con una alimentación permanente del amplificador por medio de un circuito HF VOX de reacción rápida integrado. La alimentación del preamplificador es 13.8 V y puede tomarlos directamente de la toma de corriente continua o a través de la fuente de alimentación remota a través del cable coaxial y de la toma TRX. El amplificador está construido con un MMIC de GaAs (Arseniuro de Galio) de última tecnología sobre sustrato de microondas de alta calidad en tecnología SMD. El paso de banda a la salida del amplificador asegura una buena selección de banda, de modo que todas las señales que se encuentran fuera de la banda útil se suprimen eficazmente. Además, al ser de alta calidad, el preamplificador es sensible, lo que significa que si la temperatura física baja, la temperatura de ruido también lo hará y mejorará la recepción. En la Figura 5.17 se muestra el preamplificador de bajo ruido SP-70.



Figura 5.17. Preamplificador de bajo ruido SP-70.

En la Figura 5.18 se detalla el diagrama de Operación del Segmento Terrestre, mostrando así los elementos que en este capítulo se explicaron. Además las conexiones entre los componentes de comunicación son: Entre MS100 y GS100→Serial, entre GS100 y AX100→UHF Half-dúplex, entre AX100 y OBC→I2C.

Las demás conexiones fueron entre el GS100 y el Preamplificador→Cable Coaxial, y entre el Preamplificador y la Antena→ Cable Coaxial [15].



IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCÉPTOR EN EL SEGMENTO TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1

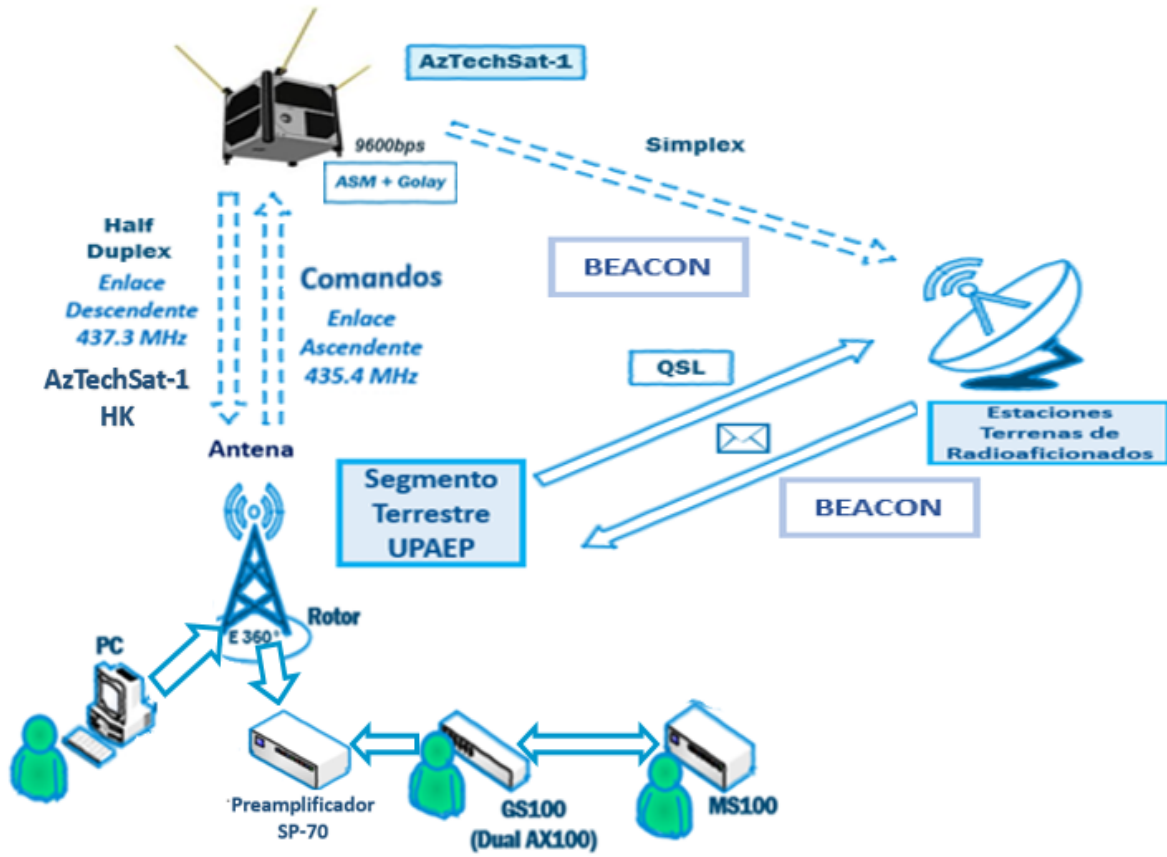


Figura 5.18. Diagrama de Operación del Segmento Terrestre.



CAPÍTULO VI

REQUERIMIENTOS DEL SEGMENTO TERRESTRE

En la realización de cualquier proyecto es indispensable especificar los requerimientos que éste necesita. Para el caso del nanosatélite AzTechSat-1 se realizó un listado de los requerimientos para cada subsistema y en éste capítulo se detallan los requerimientos técnicos del Segmento Terrestre, puesto que es el subsistema en el que se encuentra el transceptor. Los requerimientos se dividen en 3 niveles, en donde el Nivel 1 es el nivel de requerimientos generales y el Nivel 4 es el nivel de requerimientos más específicos [16].

La Tabla 6.1 detalla los requerimientos de Nivel 1 del subsistema Segmento Terrestre.

Tabla 6.1. Requerimientos Nivel 1 del Segmento Terrestre.

Requerimientos Nivel 1 del Segmento Terrestre	
Nomenclatura	Descripción
GS-1.1	El AzTechSat-1 debe usar un módulo UHF para transmitir datos hacia la Estación Terrena ubicada en UPAEP.
GS-1.2	La UPAEP debe tener una Estación Terrena funcional para establecer comunicación con el módulo UHF del AzTechSat-1.



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

68

GS-1.3	La UPAEP debe contar con las licencias establecidas por el IFT(Instituto Federal de Telecomunicaciones) para recibir y transmitir mensajes a la frecuencia entre 430-440 MHz.
--------	---

Tabla 6.2. Requerimientos Nivel 2 del Segmento Terrestre.

Requerimientos Nivel 2 del Segmento Terrestre	
Nomenclatura	Descripción
GS-2.1	El Segmento Terrestre debe tener una antena para establecer comunicación con el AzTechSat-1.
GS-2.2	El Segmento Terrestre debe notificar a los radioaficionados que ellos serán capaces de escuchar al satélite para obtener su QSL.
GS-2.3	El Segmento Terrestre debe ser capaz de codificar y enviar telecomandos.
GS-2.4	El Segmento Terrestre debe ser capaz de decodificar los mensajes recibidos desde el AzTechSat-1.
GS-2.5	El módulo UHF debe tener una alimentación de corriente directa.



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

GS-2.6	El módulo UHF debe estar en un rango de temperatura adecuado que no afecte su operación.
GS-2.7	El módulo UHF debe establecer comunicación con la Estación Terrena.
GS-2.8	El módulo UHF debe contar con una antena para enviar y recibir datos.
GS-2.9	El módulo UHF y el Segmento Terrestre deben establecer comunicación dentro del rango de 430-440 MHz.
GS-2.10	El módulo UHF debe tener comunicación con otros subsistemas del satélite.
GS-2.11	El módulo UHF debe ser capaz de iniciar y terminar actividades.

Tabla 6.3. Requerimientos Nivel 3 del Segmento Terrestre.

Requerimientos Nivel 3 del Segmento Terrestre	
Nomenclatura	Descripción
GS-3.1	La estación terrena necesita decodificar los datos recibidos por el AzTechSat-1.



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

70

GS-3.2	Los pines del módulo UHF para las tareas de configuración deben estar alimentados.
GS-3.3	Los pines de comunicación serial del módulo UHF deben tener parámetros actualizados.
GS-3.4	El conector de la antena del módulo UHF requiere una impedancia específica.
GS-3.5	El módulo UHF debe esperar telecomandos específicos de la Estación Terrena.
GS-3.6	El módulo UHF debe enviar datos o medidas a la Estación Terrena.
GS-3.7	El módulo UHF debe enviar y recibir cadena de caracteres con una estructura específica.
GS-3.8	El módulo UHF debe tener una interface de comunicación interna.
GS-3.9	El módulo UHF debe esperar el bus de datos internos.
GS-3.10	El módulo UHF debe transmitir información dentro de las frecuencias establecidas.



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSECTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

Tabla 6.4. Requerimientos Nivel 4 del Segmento Terrestre.

Requerimientos Nivel 4 del Segmento Terrestre	
Nomenclatura	Descripción
GS-4.1	El Segmento Terrestre debe automatizar el control del rotor y checar el movimiento de la antena a través de la cámara.
GS-4.2	La antena debe tener un preamplificador conectado para la banda UHF y establecerlo a 17 dB de ganancia para poder amplificar la señal recibida en la Estación Terrena.
GS-4.3	La transmisión de potencia del transceptor debe ser variable para poder transmitir a la salida 2.2 W.
GS-4.4	El transceptor debe tener la capacidad de comunicarse con el preamplificador a través del cable coaxial usado para recibir y transmitir la señal.



CAPÍTULO VII

LINK BUDGET, TELECOMANDOS Y TELEMETRÍA

El presente capítulo presenta las simulaciones realizadas para definir el presupuesto de enlace (link budget), además presenta los comandos establecidos desde la estación terrena para revisar el estatus del nanosatélite, es importante mencionar que no se profundizará mucho en los temas puesto que este tema está fuera del alcance del trabajo presente.

7.1 LINK BUDGET

Para poder realizar las simulaciones el equipo del Segmento Terrestre utilizó un simulador desarrollado por Jan A. King, W3GEY/VK4GEY [17], en el cuál los parámetros definidos son principalmente la órbita (LEO) y las antenas utilizadas (Antena 436CP42UG; ANT430 Omnidireccional).

Los parámetros principales de la órbita LEO son:

- Radio de la Tierra: 6,378.136 km.
- Altura de Apogeo: 400 km.
- Altura de Perigeo: 400 km.
- Inclinación: 51.65°
- Ángulo de elevación (d): 15°
- Distancia Oblicua (S): 1,175.5 km.

De acuerdo con el simulador ocupado, la Figura 7.1 muestra la geometría calculada de la órbita LEO.

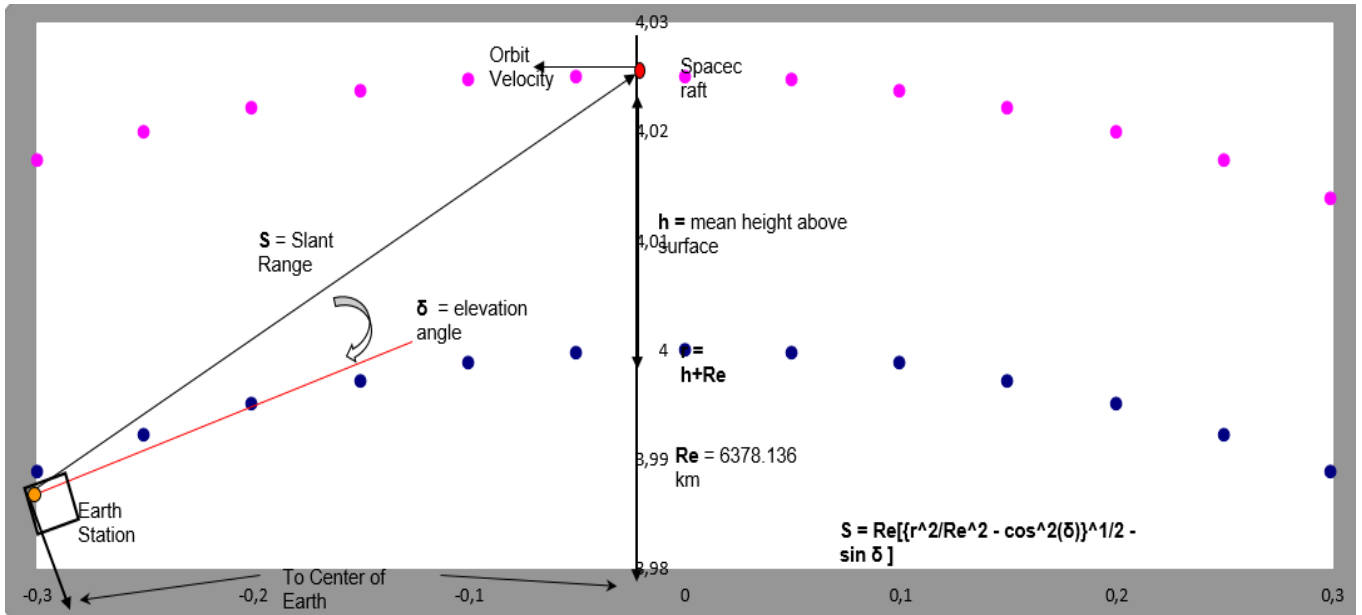


Figura 7.1. Geometría de la órbita LEO.

Es muy importante calcular las pérdidas de trayectoria de acuerdo a la órbita seleccionada, por lo que el simulador calcula dichas pérdidas en relación con las frecuencias establecidas para el enlace ascendente y descendente. Además, el simulador es capaz de calcular la longitud de onda de acuerdo a la frecuencia establecida, por lo cual para la frecuencia 435.4 MHz su longitud de onda es 0.689 metros, y para la frecuencia 437.3 MHz su longitud es 0.686 metros. En la Figura 7.2 se muestran las pérdidas de trayectoria para ambos enlaces.

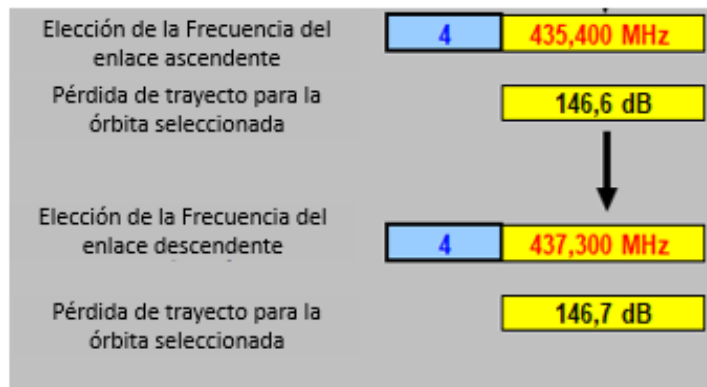
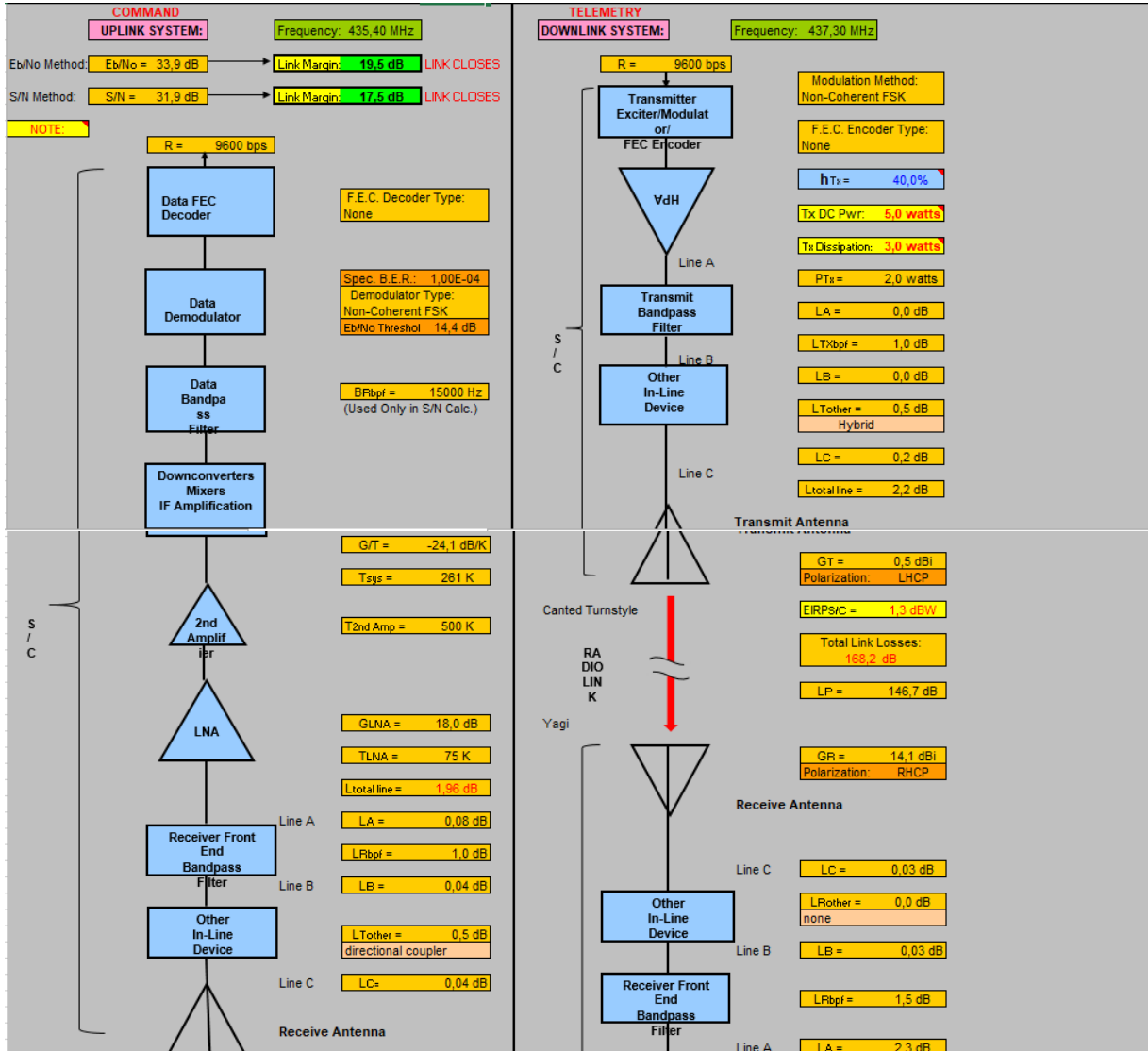


Figura 7.2. Pérdida de trayectoria de la órbita seleccionada.



IMPLEMENTACIÓN DE TRANCEPTOR EN EL SEGMENTO TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1

En la Figura 7.3 se presenta un resumen del desempeño del sistema, donde se visualiza por medio de diagramas el link budget del enlace ascendente y descendente.





**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCÉPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

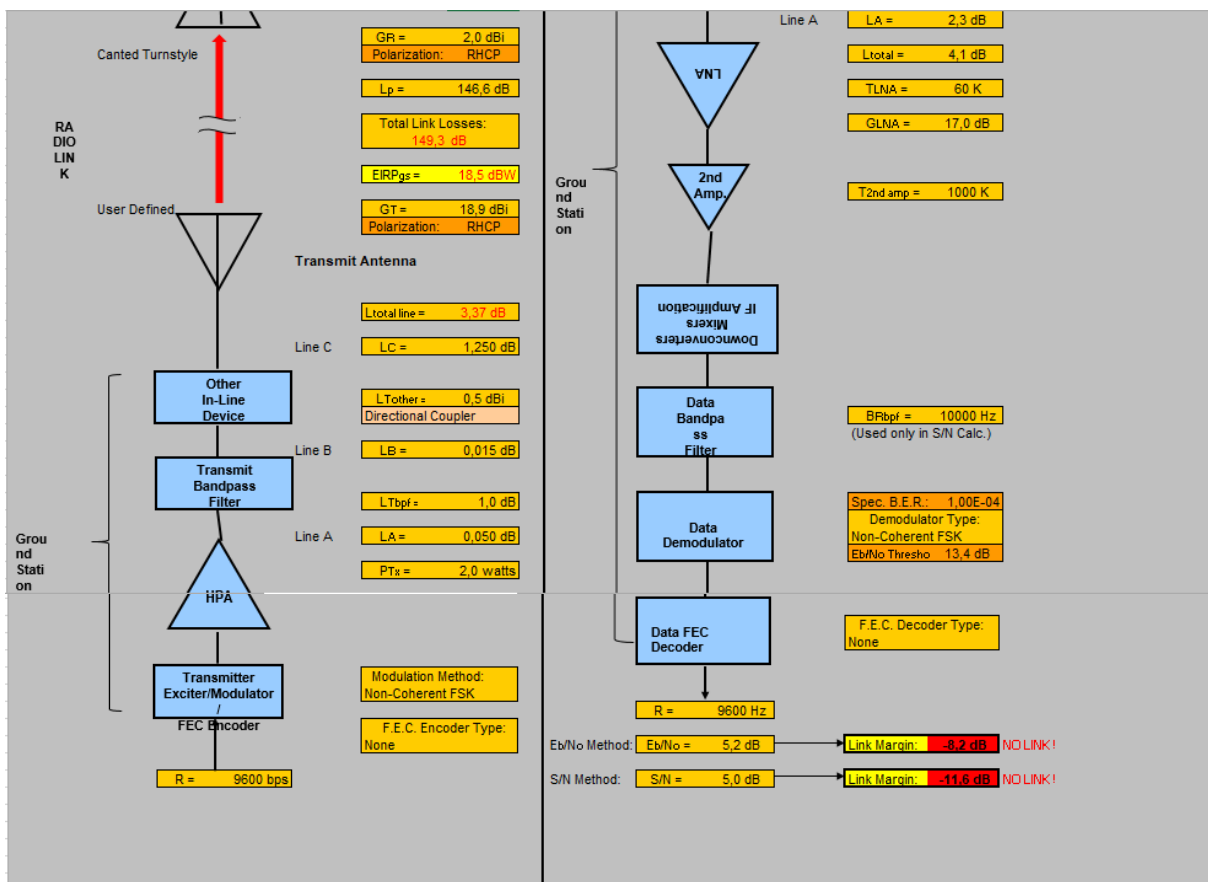


Figura 7.3. Resumen del desempeño del sistema.

Finalmente, los resultados para el enlace ascendente y descendente para la Estación Terrena del AzTechSat-1 se presentan en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Parámetros calculados de link budget para la Estación Terrena del AzTechSat-1.

Parámetros calculados de Link Budget para la Estación Terrena del AzTechSat-1.			
Parámetros	Uplink	Downlink	Unidades
Potencia de salida del transmisor	33.424227	31.760913	dBm
Ganancia de la antena del CubeSat	0,0	0	dBi
Suma de pérdidas en el transmisor	0.5	0.5	dB



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCÉPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

Pérdidas en el espacio libre	137.290885	137.290885	dB
Otras pérdidas	5.0	5	dB
Ganancia de la antena en la Estación Terrena	17.0	24.0	dBi
Pérdidas en el receptor	1.0	1.0	dB
Potencia recibida	-93.3667	-78.03	dBm
Margen	23	38	

7.1 TELECOMANDOS Y TELEMETRÍA

La Estación Terrena debe comunicarse con el CubeSat en modo de transmisión half-duplex para enviar telecomandos y bajar telemetría del AzTechSat-1.

En la Tabla 7.2 se presentan los parámetros de comunicación entre el nanosatélite y la estación terrena.

Tabla 7.2. Parámetros de comunicación.

Parámetros de comunicación	
Modulación	GFSK
Velocidad de bits	9600 bps
Sincronización de palabras (Sync word)	0x930B51DE
Formato del marco (Frame)	ASM+Golay (AX100 mode 5)
Codificación de bits	NRZ, most significant bit first
Canal de codificación	Reed-Solomon + CRC32
Frecuencia de enlace descendente	437.3 MHz
Frecuencia de enlace ascendente	435.4 MHz

La estructura o formato del marco es como se describe en la Figura 7.4, en donde se observa que cada vez que se inicia una conexión, aparece una señal sinusoidal al principio del marco, repetida 50 veces, por lo que se definió que la sincronización de reloj o bien Clock Sync es de 50 bytes.



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

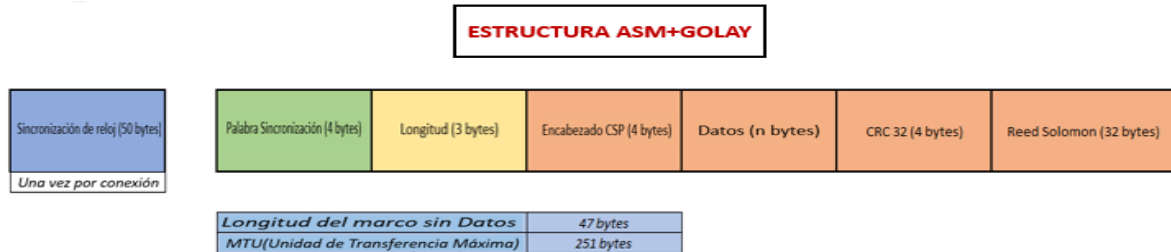


Figura 7.4. Formato de ASM+Golay.

7.1.1 Telecomandos

El transceptor de la estación terrena debe mandar datos al AzTechSat-1 llamados telecomandos, con la finalidad de que ejecuten algunas acciones en el nanosatélite. La Tabla 7.3 muestra la descripción de cada telecomando.

Tabla 7.3. Telecomandos



Telecomandos	
Telecomando	Descripción
HK-GS	Descarga el archivo HK localizado en la memoria de la OBC (Nanomind A3200) hacia la memoria del MS100 con un comando llamado ftp (file transfer protocol) desde la terminal csp de MS100. El comando utilizado es: ftp download file /flash/hk_files.txt
HK-RA	Descarga el HK desde el CubeSat hacia las estaciones de radioaficionados.
STINGR CYCLE 1	Empieza la transmisión, Ciclo 1.
SHUTDOWN STINGR	Apaga el módulo STINGR.
TURN ON STINGR	Enciende el módulo STINGR.
UTC Unix time	Envía al CubeSat el Unix Time o fecha actualizada.
Shut down SAT 1	Activa la primera bandera para apagar/encender el CubeSat.
Shut down SAT 2	Activa la segunda bandera para apagar el CubeSat.
Shut down SAT 3	Apaga el CubeSat
RESET MO	Comando de reinicio del satélite (EPS Hard Reset).
STINGR NO CYCLE	Empieza la transmisión con cierto número de marcos y ráfagas por conexión.
STINGR RESET	Reinicia el módulo STINGR





**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

Cada vez que el AzTechSat-1 recibe un telecomando, manda una respuesta llamada acknowledgment (acuse de recibo) a la estación terrena para confirmar que recibió el comando. Además, como se mencionó anteriormente existen 3 telecomandos seriados para apagar las comunicaciones, el procedimiento es mandar uno a uno los comandos y hasta recibir el tercer comando se confirma que se requieren apagar las comunicaciones, evitando así el apagado accidental de alguna comunicación.

En la Figura 7.5 se muestran los comandos y su longitud en bytes [18].

Comandos de Enlace Ascendente

Código	Nombre	Sync Reloj	Sync Palabra	Longitud	Encabezado CSP	Indicativo	Comando	CRC32	Reed-Solomon
HK	HK-GS				MS100 Terminal Command				
C1	HK-RA	0xAA	930851DE	Variable	Variable	XE1	F51	Variable	Variable
C2	STINGR CYCLE 1	0xAA	930851DE	Variable	Variable	XE1	5cL	Variable	Variable
C3	STINGR NO CYCLE	0xAA	930851DE	Variable	Variable	XE1	JcX	Variable	Variable
C4	Shutdown STINGR	0xAA	930851DE	Variable	Variable	XE1	LfR	Variable	Variable
C5	TURN ON STINGR	0xAA	930851DE	Variable	Variable	XE1	Af4	Variable	Variable
C6	STINGR RESET	0xAA	930851DE	Variable	Variable	XE1	r0C	Variable	Variable
C7	UTC Unix time	0xAA	930851DE	Variable	Variable	UPX	XXX	Variable	Variable
C8	Shutdown SAT 1	0xAA	930851DE	Variable	Variable	5Ds	4cR	Variable	Variable
C9	Shutdown SAT 2	0xAA	930851DE	Variable	Variable	sd5	RfB	Variable	Variable
C10	Shutdown SAT 3	0xAA	930851DE	Variable	Variable	NS4	M16	Variable	Variable
C11	RESET MO	0xAA	930851DE	Variable	Variable	XE1	ES1	Variable	Variable
	Longitud (bytes)	50	4	3	4	3	4	4	32
	Longitud Total con Sync Reloj (bytes)	104							
	Longitud Total sin Sync Reloj (bytes)	54							

Figura 7.5. Comandos del enlace ascendente.

7.1.2 Telemetría

El AzTechSat-1 enviará hacia Tierra un paquete llamado beacon cuyas funciones principales son: encontrar al satélite después de su liberación de la Estación Espacial Internacional, dar



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

seguimiento a la información del satélite con un bajo consumo en la batería, descargar el estatus HK (House Keeping) del satélite en la estación terrena de UPAEP y proveer datos a las estaciones de radioaficionados para decodificar los mensajes y poder obtener un QSL.

En la Tabla 7.4 se presenta la estructura del beacon, así como su longitud en bytes.

Tabla 7.4. Estructura del beacon.

Estructura del beacon								
Nombre	Respuesta a	Preámbulo	Sintonía	Longitud	Encabezado CSP	Comando	CRC32	Reed-Solomon
Beacon	HK-GS	0xAA	930B51DE	Variable	Variable	upaep.mx/azt+HK	Variable	Variable
Longitud (bytes)		50	4	3	4	169	4	32
Longitud Total (bytes)		266						

Para comprender y conocer a que se refiere el HK se presenta la Tabla 7.5, en la cual se aprecia los datos que el HK contendrá, su tipo de dato, su longitud y a qué subsistema pertenece cada dato [19]. Por esta razón el HK es un estatus del nanosatélite.

Tabla 7.5. Datos del HK.

Datos del HK				
Byte Position	Data	Subsystem	Type	Length (bytes)
0	Empieza '<' 'H' 'K' '>'			4
4	Voltaje de los convertidores de potencia [mV] [PV1]	EPS	uint_16	2
6	Voltaje de los convertidores de potencia [mV] [PV2]	EPS	uint_16	2
8	Voltaje de los convertidores de potencia [mV] [PV3]	EPS	uint_16	2
10	Voltaje de la Batería [mV]	EPS	uint_16	2
12	Corriente de entrada [mA] [1]	EPS	uint_16	2
14	Corriente de entrada [mA] [2]	EPS	uint_16	2
16	Corriente de entrada [mA] [3]	EPS	uint_16	2
18	Corriente de los convertidores boost [mA]	EPS	uint_16	2
20	Corriente de salida de la batería [mA]	EPS	uint_16	2
22	Corriente de salida [mA] [1] [OBC]	EPS	uint_16	2



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

24	Corriente de salida [mA] [2] [AX100]	EPS	uint_16	2
26	Corriente de salida [mA] [3] [Aguila Board LM70]	EPS	uint_16	2
28	Corriente de salida [mA] [4] [Aguila Board]	EPS	uint_16	2
30	Estatus de los canales de salida [0 or 1] [1] [OBC]	EPS	uint_8	1
31	Estatus de los canales de salida [0 or 1] [2] [AX100]	EPS	uint_8	1
32	Estatus de los canales de salida [0 or 1] [3] [Aguila Board LM70]	EPS	uint_8	1
33	Estatus de los canales de salida [0 or 1] [4] [Aguila Board]	EPS	uint_8	1
34	I2C wdt time izquierdo [s]	EPS	uint_32	4
38	GND wdt time izquierdo [s]	EPS	uint_32	4
42	WDT GND número de reinicio	EPS	uint_32	4
46	Sensor de temperatura de las baterías	EPS	int_16	2
				44
48	Temperatura del amplificador de potencia [tenth of °C]	COM	int_16	2
50	Último RSSI	COM	int_16	2
52	GND RSSI	COM	int_16	2
				6
54	Sensor A valor [tenth of °C]	OBC	int_16	2
56	PWM actual	OBC	uint_16	2
58	Última causa de reinicio de OBC	OBC	uint_32	4
62	Magnetómetro - X axis	OBC	float	4
66	Magnetómetro - Y axis	OBC	float	4
70	Magnetómetro - Z axis	OBC	float	4
74	Gyro - X axis	OBC	float	4
78	Gyro - Y axis	OBC	float	4
82	Gyro - Z axis	OBC	float	4
				32
86	Canal RF	PYL	uint_8	1
87	# Ráfagas	PYL	uint_8	1
88	Intervalo mínimo de ráfaga	PYL	uint_8	1
89	Intervalo máximo de ráfaga	PYL	uint_8	1
90	Estatus del Hardware	PYL	uint_8	1



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSECTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

91	Número de segundos desde la transmisión	PYL	uint_16	2
93	Número de segundos hasta la siguiente transmisión.	PYL	uint_16	2
95	Tamaño del paquete del último o actual mensaje.	PYL	uint_8	1
96	Actualmente esperando o enviando el número de ráfaga	PYL	uint_8	1
97	Número de segundos hasta la transmisión de la ráfaga número 2	PYL	uint_16	2
99	Número de segundos hasta la transmisión de la ráfaga número 3	PYL	uint_16	2
101	Mensajes totales transmitidos en el modo actual.	PYL	uint_16	2
103	Paquetes totales transmitidos desde el encendido.	PYL	uint_16	2
105	Temperatura de la antena	PYL	char	1
106	Temperatura del sensor SPI	PYL	uint_16	2
				22
108	Unix Time	-	uint_32	4
112	Valor de los sensores solares gruesos +Y	ADCS	uint_16	2
114	Valor de los sensores solares gruesos +X	ADCS	uint_16	2
116	Valor de los sensores solares gruesos -X	ADCS	uint_16	2
118	Valor de los sensores solares gruesos -Y	ADCS	uint_16	2
120	Valor de los sensores solares gruesos -Z	ADCS	uint_16	2
122	Temperatura de los paneles solares +Y	ADCS	float	4
126	Temperatura de los paneles solares +X	ADCS	float	4
130	Temperatura de los paneles solares -X	ADCS	float	4
134	Temperatura de los paneles solares -Y	ADCS	float	4
138	Temperatura de los paneles solares -Z	ADCS	float	4
142	Estatus de Bdot	ADCS	int_8	1
143	Valor de Bdot de un filtro pasa-bajas slow	ADCS	float	4
147	Valor de Bdot de un filtro pasa-bajas slow2	ADCS	float	4
151	Valor del estado detumbled	ADCS	uint_8	1
				40
152	Termina '<' '/' 'H' 'K' '>'	-		5
				157



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

El AzTechSat-1 mandará un beacon cada minuto, cuando la estación terrena reciba el primer beacon debe enviar el telecomando HK-GS para solicitar el archivo HK al nanosatélite, una vez descargado, el equipo de Operaciones de la Misión decidirá qué otro telecomando debe ser enviado. Por otra parte, cuando un radioaficionado reciba un beacon y sea capaz de decodificarlo y demostrar que es el mismo que la estación terrena de UPAEP recibió, entonces será capaz de solicitar un QSL a UPAEP.

En la Figura 7.6 se muestran los comandos del enlace descendente, así como su tipo, longitud en bytes y otros parámetros [18].

Comandos de Enlace Descendente

Nombre	Respuesta a	Sync Reloj	Sync Palabra	Longitud	Encabezado CSP	Comando	CRC32	Reed-Solomon
R1	HK-RA	0xAA	930851DE	Variable	Variable	Fs1	Variable	Variable
R2	STINGR CYCLE 1	0xAA	930851DE	Variable	Variable	Scl	Variable	Variable
R3	STINGR NO CYCLE	0xAA	930851DE	Variable	Variable	Jcl	Variable	Variable
R4	Shutdown STINGR	0xAA	930851DE	Variable	Variable	LFR	Variable	Variable
R5	TURN ON STINGR	0xAA	930851DE	Variable	Variable	Af4	Variable	Variable
R6	STINGR RESET	0xAA	930851DE	Variable	Variable	r0C	Variable	Variable
R7	UTC Unix time	0xAA	930851DE	Variable	Variable	UPA	Variable	Variable
R8	Shutdown SAT 1	0xAA	930851DE	Variable	Variable	4cR	Variable	Variable
R9	Shutdown SAT 2	0xAA	930851DE	Variable	Variable	Rf8	Variable	Variable
R10	Shutdown SAT 3	0xAA	930851DE	Variable	Variable	MI6	Variable	Variable
R11	RESET MO	0xAA	930851DE	Variable	Variable	E5I	Variable	Variable
Longitud (bytes)		50	4	3	4	4	4	32
Longitud Total (bytes)		101						

Nombre	Respuesta a	Sync Reloj	Sync Palabra	Longitud	Encabezado CSP	Comando	CRC32	Reed-Solomon
Beacon	HK-GS	0xAA	930851DE	Variable	Variable	upaep.mx/azt+HK	Variable	Variable
Longitud (bytes)		50	4	3	4	169	4	32
Longitud Total (bytes)		256						

Figura 7.6. Comandos del enlace descendente.

Finalmente, todas las opciones antes mencionadas son programadas desde MS100 en el software eclipse en C++ para poder automatizar el envío y la recepción de los mensajes. En la Figura 7.7 se presenta un ejemplo del código utilizado; es preciso mencionar que el desarrollo del código se hizo en colaboración con el equipo Flight Software del proyecto AztechSat-1, debido a que al utilizar el mismo radio tanto en el satélite como en la estación terrena el código es prácticamente el mismo en ambos equipos.



IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1

84

```
aztechsat_aguil  aztechsat_oper  aztechsat_c
case 0:
puts("\nSelected auto option 0 No Cycle");
azt_pyl_msg_size_lfrc = AZT_PYL_MSG_1_PKT_LFRC;
//Setup 128 is 2,1,5,10
azt_ch_setup_process_lfrc(128);
break;

case 1:
puts("\nSelected auto option 1 No Cycle");
azt_pyl_msg_size_lfrc = AZT_PYL_MSG_2_PKT_LFRC;
//Setup 128 is 2,1,5,10
azt_ch_setup_process_lfrc(128);
break;

case 2:
puts("\nSelected auto option 2 No Cycle");
azt_pyl_msg_size_lfrc = AZT_PYL_MSG_4_PKT_LFRC;
//Setup 128 is 2,1,5,10
azt_ch_setup_process_lfrc(128);
break;

case 3:
puts("\nSelected auto option 3 No Cycle");
azt_pyl_msg_size_lfrc = AZT_PYL_MSG_8_PKT_LFRC;
//Setup 128 is 2,1,5,10
azt_ch_setup_process_lfrc(128);
break;
```

Figura 7.7. Ejemplo del código en Eclipse.



CAPÍTULO VIII

SISTEMA DE PRUEBAS

Para verificar el funcionamiento del transeptor y su computadora, se desarrolló una serie de pruebas entre la estación terrena y el CubeSat AzTechSat-1. En el presente capítulo se explica a detalle cada prueba realizada, así como las conexiones hechas y el hardware utilizado para llevar a cabo los procedimientos requeridos.

8.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

La Estación Terrestre se encuentra ubicada en los Laboratorios de Ingenierías en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP). En el capítulo V se presentaron los elementos del segmento terrestre, así como sus especificaciones, pero aquí se retoman para tener un seguimiento preciso del procedimiento.

El segmento terrestre está equipado con el transeptor GS100, el cual contiene dos radios: el AX100 primario y el AX100 secundario; la computadora MS100, la antena 436CP42UG, el preamplificador SP-70 y el rotor G500. En la Figura 8.1 se presenta un diagrama general del sistema, con sus componentes [15].



IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCÉPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1

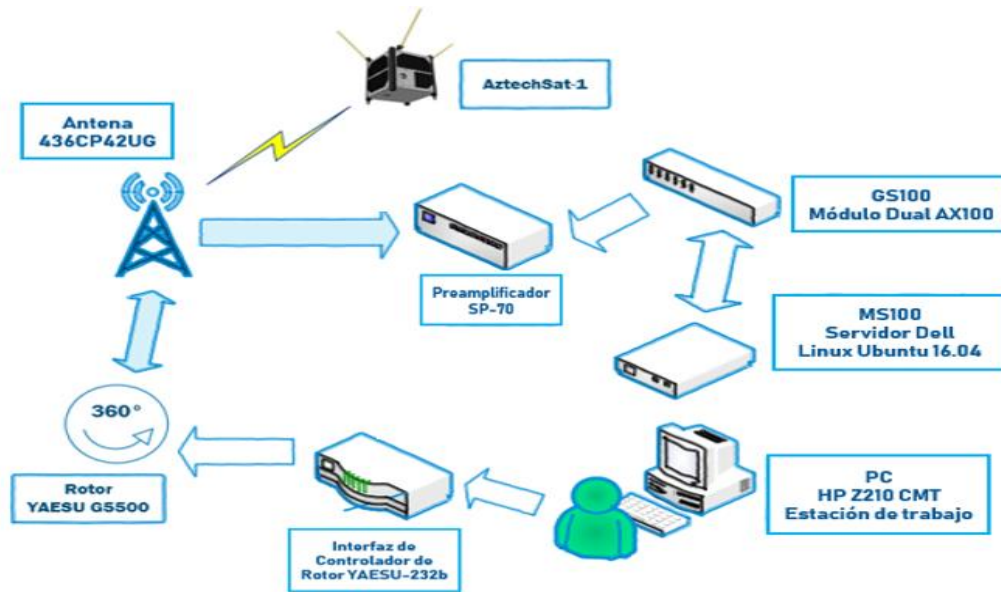


Figura 8.1. Diagrama general de componentes del Segmento Terrestre.

Para poder realizar una comunicación exitosa entre el AzTechSat-1 y el segmento terrestre en UPAEP, ambos sistemas deben estar sincronizados, es decir que el rotor debe realizar el movimiento de la antena, de tal modo que cuando el AztechSat-1 pase por México, las antenas de ambos sistemas estén orientadas y localizadas para poder recibir y transmitir mensajes. Además es muy importante que ambos sistemas estén configurados con la misma modulación, protocolo de comunicación, frecuencia, velocidad en baudios, etc., de no ser así la comunicación fallará.

La frecuencia establecida para el enlace ascendente es de 435.400 MHz, mientras que para el enlace descendente es de 437.300 MHz. El protocolo de comunicación utilizado es ASM+Golay y la modulación utilizada es GFSK a 9600 bps.

El GS100 es un transceptor compuesto por dos radios AX100, uno primario y otro secundario. Para el caso del AzTechSat-1 se utilizará el AX100 primario, puesto que permite transmitir y recibir mensajes. Dichos mensajes son telecomandos programados desde la estación terrena



ubicada en UPAEP, los cuales son enviados a través de comunicación semiduplex en el rango de frecuencias UHF hacia el CubeSat para ejecutar algunas acciones.

Debido a que el núcleo fundamental del Segmento Terrestre radica en el transceptor (encargado de enviar, recibir y modular las señales, así como también de dar la potencia necesaria para la transmisión) y la computadora de éste (encargada de decodificar, editar y crear los datos), en la Figura 8.2 se presenta el diagrama de conexiones entre estos equipos [15].



Figura 8.2. Diagrama de conexión entre MS100 y GS100.

8.2 PRUEBA DE COMUNICACIÓN

En los capítulos anteriores se mencionó que los equipos utilizados como el GS100 y MS100 son equipos adquiridos por la empresa GomSpace, por lo cual resulta indispensable consultar los manuales [20], [21]. En el manual de NanoComAX100 se recomienda usar el protocolo ASM+Golay y modulación GFSK, por esta razón se utiliza el modo 5 del manual ubicado en la sección de formatos de marco.

8.2.1 Prueba de Recepción y Transmisión en la Estación Terrena

En primer lugar se realizó la prueba del MS100, debido a que es la computadora de la estación terrena. A continuación se describen los pasos realizados en dicha prueba.



Primero se deben conectar los equipos utilizados, es decir el MS100 (computadora), GS100 (transceptor), antena. Las especificaciones de alimentación de cada equipo vienen dadas en el manual, y se presentan en la Tabla 8.1. Posteriormente se debe encender el MS100 y GS100.

Tabla 8.1. Parámetros de alimentación

Parámetros de alimentación	
Equipo	Alimentación
MS100	220 V AC (50-60 Hz)
GS100	12 V a 6 A

El primer paso para comprobar el funcionamiento de la computadora MS100 fue registrarse, utilizando la contraseña predeterminada dada por GomSpace. En este paso es recomendable utilizar una computadora remota para conectarse al MS100, abrir una terminal y correr el comando:

```
ssh ms100@<ip address of MS100>
```

El siguiente paso es ingresar al MS100 y checar que csp-doppler y csp-term estén corriendo, utilizando el comando:

```
ms100@ms100:~$ tmux ls
```

La Figura 8.3 muestra la lista de funciones que se están corriendo, en este caso se confirma que el csp-doppler y csp-term están corriendo sin falla; además se visualiza que tanto el AX100 primario y como el secundario también están funcionando.

```
ms100@ms100:~$ tmux ls
ax100_primary: 1 windows (created Mon Apr 29 13:58:44 2019) [80x26]
ax100_secondary: 1 windows (created Mon Apr 29 13:58:44 2019) [80x23]
csp-doppler: 1 windows (created Mon Apr 29 13:58:44 2019) [80x23]
csp-term: 1 windows (created Mon Apr 29 17:05:06 2019) [80x30]
ms100@ms100:~$ █
```

Figura 8.3. Revisión de csp-doppler, csp-term, AX100 Primario y AX10 Secundario.



Después, se debe checar que todos los servicios estén corriendo como se muestra en la Figura 8.4, con el comando:

```
ms100@ms100:~$ systemctl list-units gs_*
```

```
ms100@ms100:~$ systemctl list-units gs *
UNIT                                LOAD    ACTIVE SUB    DESCRIPTION
gs_ax100gosh.service               loaded active running GomSpace AX100 Gosh Service
gs_csp Doppler.service             loaded active running GomSpace CSP-Doppler Service
gs_csp term.service                loaded active running GomSpace CSP-Term Service
gs_rotctld.service                 loaded active running GomSpace Rotor Controller Ser
gs_zmqbridge_primary.service        loaded active running GomSpace ZMQBridge (primary)
gs_zmqbridge_secondary.service      loaded active running GomSpace ZMQBridge (seconda
gs_zmqproxy.service                loaded active running GomSpace ZMQProxy

LOAD    = Reflects whether the unit definition was properly loaded.
ACTIVE  = The high-level unit activation state, i.e. generalization of SUB.
SUB     = The low-level unit activation state, values depend on unit type.

7 loaded units listed. Pass --all to see loaded but inactive units, too.
To show all installed unit files use 'systemctl list-unit-files'.
lines 1-15/15 (END)
```

Figura 8.4. Revisión de servicios.

Una vez realizados los pasos anteriores, se debe conectar al servicio csp-term con el comando

```
ms100@ms100:~$ tmux a -t csp-term
```

En este paso se debe confirmar que es posible hacer ping a ambos AX100 (29 para el primario y 30 para el secundario), como se muestra en la Figura 8.5. Los comandos para hacer ping son:

```
csp-term # ping 29
```

```
csp-term # ping 30
```

```
csp-term # ping 29
Ping name 29, timeout 1000, size 1: Reply in 13.835 ms
csp-term # ping 30
Ping name 30, timeout 1000, size 1: Reply in 13.741 ms
csp-term #
```

Figura 8.5. Ping 29 (AX100 primario), Ping 30 (AX100 secundario)



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCÉPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

90

Si ocurre algún error, es necesario reiniciar el Sistema.

Como se mencionó en el capítulo V, el GS100 tiene un convertidor FTDI USB a serie, que proporciona cuatro puertos serie al MS100 que son: TTYUSB0: Interfaz de radio primaria CSP/KISS, TTYUSB1: Serie de radio primaria/Interfaz GOSH, TTYUSB2: Radio secundaria Interfaz CSP/KISS, TTYUSB3: Serie de radio secundaria/Interfaz GOSH, como se muestra en la Figura 8.6.

```
ms100@ms100: ~  
ms100@ms100:~$ ls -la /dev/ttyUSB*  
crw-rw---- 1 root dialout 188, 0 Apr 12 21:54 /dev/ttyUSB0  
crw-rw---- 1 root dialout 188, 1 Apr 12 19:52 /dev/ttyUSB1  
crw-rw---- 1 root dialout 188, 2 Apr 12 21:54 /dev/ttyUSB2  
crw-rw---- 1 root dialout 188, 3 Apr 12 19:45 /dev/ttyUSB3  
ms100@ms100:~$
```

Figura 8.6. Puertos Seriales.

Para el AzTechSat-1 los puertos utilizados son TTYUSB1 y TTYUSB3 debido a que tienen conexión serial GOSH (GomSpace Shell) y particularmente con el primero porque se conecta al AX100 primario, el cual es capaz de enviar y recibir comandos. El comando para entrar a minicom es:

ms100@ms100:~\$ minicom -D /dev/ttyUSB1 -con

En la Figura 8.7, se aprecia la entrada a la terminal minicom, misma que ha sido utilizada para configurar al NanoMind A3200 (computadora del satélite), en la cual se pretende conocer la ruta (con el comando **route**) que sigue la comunicación entre el GS100 y el MS100, en éste caso AX100 0/0 es la ruta por defecto, en KISS muestra 8/2 es decir que la dirección es 8, y los bits de máscara de red son 2.



IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCÉPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1

```
ms100@ms100:~$ minicom -D /dev/ttyUSB1 -con
ms100@ms100: ~
Welcome to minicom 2.7
OPTIONS: I18n
Compiled on Nov 15 2018, 20:18:47.
Port /dev/ttyUSB1, 19:52:56
Press CTRL-A Z for help on special keys
nanocom-ax # route
30/5 LOOP
0/0 AX100
8/2 KISS
```

Figura 8.7.1 Minicom TTYUSB1.

En la realización de esta prueba se presentaron algunas dificultades, puesto que al entrar a minicom la terminal se quedaba pasmada y no permitía conocer la ruta especificada. Aunado a ello, después de cierto tiempo empezaron a aparecer comandos extraños incluso sin teclear nada.

Debido a este problema se consultó a los fabricantes para que dieran soporte técnico y lo que recomendaron fue ingresar el siguiente comando para entrar al AX100 primario, en la terminal tio. La Figura 8.8 muestra la entrada a tio (Aplicación de terminal TTY simple).

```
ms100@ms100:~$ tmux a -t ax100_primary
[tio 02:47:54] tio v1.25
[tio 02:47:54] Press ctrl-t q to quit
[tio 02:47:54] Connected

nanocom-ax #
nanocom-ax #
nanocom-ax #
```

Figura 8.8. Terminal tio.

Una vez dentro del AX100 primario, se configura la tabla de configuración del sistema. En la cual se configuraron los parámetros de tx_inhibit en cero, y tx_pwr en mínimo=0. La Figura 8.9 muestra los parámetros de la Tabla 0: Configuración del sistema, del AX100.

```
nanocom-ax # param mem 0
```



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

91

nanocom-ax # param list
nanocom-ax # param set tx_inhibit 0



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSECTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

92

```
nanocom-ax # param set tx_pwr 0
nanocom-ax # param save 0 0
0x0004 bgndrssi_ema      FLT 0.500000
0x0008 csp_node         U8 29
0x0009 i2c_en          BL false
0x000B can_en          BL false
0x000C extptt_en       BL true
0x000D led_en          BL true
0x000E kiss_usart      I8 4
0x000F gosh_usart      I8 2
0x0010 i2c_addr        U8 5
0x0012 i2c_khz         U16 400
0x0014 can_khz         U16 1000
0x0018 reboot_in       U16 0
0x001C tx_inhibit      U32 0
0x0020 log_store       U8 0
0x0021 tx_pwr          U8 0
0x0024 bcn_interval    U32 10
0x0028 bcn_holdoff     U32 4800
0x002C max_tx_time     U16 100
0x002E max_idle_time   U16 3600
0x0030 csp_rtable      STR ""
```

Figura 8.9. Parámetros de Tabla 0: Configuración del Sistema.

Configurar la tabla 1, que es la tabla de recepción con los parámetros deseados. La Figura 8.10 muestra los parámetros de la Tabla 1: Configuración del Receptor, del AX100.

```
nanocom-ax # param mem 1
nanocom-ax # param list
nanocom-ax # param set freq 437300000
nanocom-ax # param set baud 9600
nanocom-ax # param set modindex 0.5
nanocom-ax # param set csp_rand false
nanocom-ax # param set ax25_call XE1SCL
nanocom-ax # param save 1 1
```




IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCÉPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1

```
0x0000 freq          U32 435400000
0x0004 baud          U32 9600
0x0008 modindex      FLT 0.500000
0x000C guard         U16 50
0x000E pllrang       U8 9
0x000F mode          U8 5
0x0010 csp_hmac      BL false
0x0011 csp_rs        BL true
0x0012 csp_crc       BL true
0x0013 csp_rand      BL false
0x0020 csp_hmac_key  DAT 00000000000000000000000000000000
0x0030 ax25_call     STR "XE1SCL"
0x0040 preamb        X8 0xAA
0x0041 preamb_len    U8 50
0x0042 preamb_flags  U8 56
0x0043 intfrm        X8 0xAA
0x0044 intfrm_len    U8 0
0x0045 intfrm_flags  U8 56
0x0048 rssibusy      I16 -95
0x004A kup_delay     U8 0
0x004C pa_level      X16 0x04A9
0x0050 ber           FLT 0.000000
nanocom-ax #
```

Figura 8.11. Parámetros de Tabla 5: Configuración del Transmisor.

Hacer ping 5 desde el AX100 primario para comprobar comunicación con el AX100 a bordo (Figura 8.12).

```
nanocom-ax # ping 5
Ping name 5, timeout 1000, size 1: 3120384632.930 csp: Wait: 0x168c
3120384632.931 csp: Post: 0x168c
3120384632.932 csp: Wait: 0x1684
3120384632.933 csp: Post: 0x1684
3120384632.934 csp: GET: 0x7c38 0x7c38
3120384632.935 csp: OUT: S 29, D 5, Dp 1, Sp 59, Pr 2, Fl 0x00, Sz 1 VIA: AX100
3120384632.938 csp: FREE: 0x7c38
3120384633.102 csp: GET: 0x7d60 0x7d60
3120384633.128 csp: INP: S 5, D 29, Dp 59, Sp 1, Pr 2, Fl 0x00, Sz 1 VIA: AX100
3120384633.130 csp: FREE: 0x7d60
3120384633.131 csp: Wait: 0x1684
3120384633.132 csp: Post: 0x1684
Reply in 203.566 ms
```

Figura 8.12. Ping 5 desde Estación Terrena hacia AzTechSat-1.

Desde el CubeSat se manda ping 29 para comprobar comunicación con el AX100 primario de la estación terrena (Figura 8.13).



IMPLEMENTACIÓN DE TRANSEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1

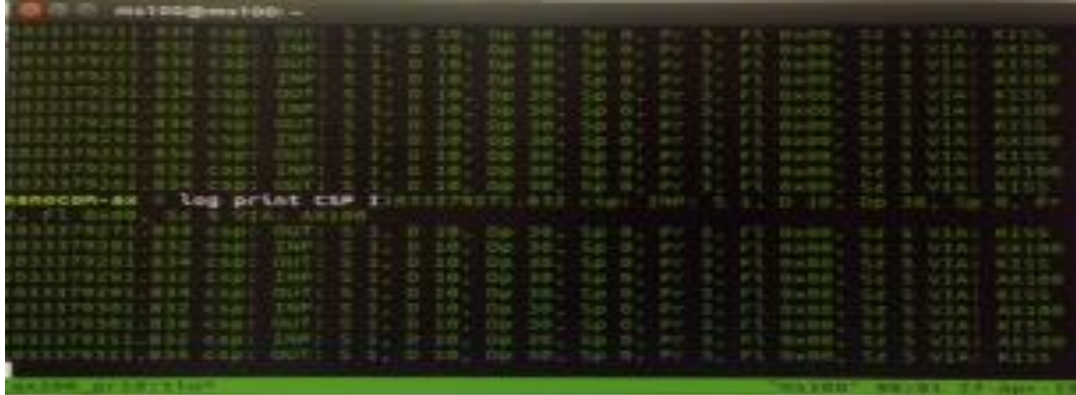


Figura 8.13. Ping 29 desde AzTechSat-1 hacia Estación Terrena.

Para poder depurar la comunicación y el enrutamiento entre nodos csp, como se muestra en la Figura 8.14 y Figura 8.15, se pueden utilizar cualquiera de los siguientes comandos:

```
nanocom-ax # log list
nanocom-ax # log print csp I

nanocom-ax # log list
Group      Print Store
axsem     EW... EW...
event     .....
frame     .....
reset     EWIDT EW...
mac       EW... EW...
user      EWIDT EW...
default   EWIDT EW...
csp       EWI.. EW...
spi       EW... .....
twim      .....
can       EWI.. .....
gsspi     EW... EW...
i2c       .....
nanocom-ax # log print csp I
Set mask of group csp from 0x1C to 0x1C
nanocom-ax #
```

Figura 8.14. Enrutamiento entre nodos csp, comando log list y log print csp I.

```
nanocom-ax # debug csp i
nanocom-ax # debug csp i
Set mask of group csp from 0x1C to 0x1C
nanocom-ax #
```



IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCÉPTOR EN EL SEGMENTO TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1

96

```
1033379501.834 csp: OUT: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379511.834 csp: INP: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379521.834 csp: OUT: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379531.834 csp: INP: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379541.834 csp: OUT: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
usage: print <group>[,<group>] <Err|Wrn|Inf|Dbg|Trc|Std|All|No>
Could not execute command 'log print csp 1', error -2
nanocom-ax = 1033379531.832 csp: INP: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379531.834 csp: OUT: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
nanocom-ax = 1033379541.832 csp: INP: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379541.834 csp: OUT: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379551.832 csp: INP: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379551.834 csp: OUT: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
nanocom-ax =
nanocom-ax = 1033379561.832 csp: INP: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379561.834 csp: OUT: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
nanocom-ax =
nanocom-ax = debug csp 1
Set mask of group csp from 0x1C to 0x1C
nanocom-ax = 1033379571.832 csp: INP: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379571.834 csp: OUT: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379581.832 csp: INP: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379581.834 csp: OUT: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379591.832 csp: INP: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379591.834 csp: OUT: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379601.832 csp: INP: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379601.834 csp: OUT: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379611.832 csp: INP: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
1033379611.834 csp: OUT: 5 1, 0 10, Dp 30, Sp 0, Pr 3, Fl 0x00, Sz 3 VIA: AX100
```

Figura 8.15. Depuración de comunicación, debug csp i.

8.2.1 Prueba de Potencia de Transmisión en la Estación Terrena

Siempre que se trabaje con radios o transceptores es muy importante hacer pruebas de la potencia transmitida, debido a que existe potencia efectiva radiada y potencia reflejada, es decir que si existe discrepancia entre la impedancia del conector de la antena y la carga o resistencia no será posible transferir toda la potencia, lo que ocasionará que la potencia regrese por la línea de transmisión hacia la fuente y eso puede ocasionar serios daños en el transceptor.

El índice de comparación entre la potencia efectiva radiada por el radio y la potencia devuelta al radio es conocido como ROE (Relación de Ondas Estacionarias), en otras palabras, es una medida del nivel de ondas estacionarias en un alimentador. La ROE maneja una descripción genérica para las ondas estacionarias de corriente y tensión. Tanto el voltaje como la corriente aumentan y disminuyen en la misma proporción para un desajuste dado. La Figura 8.16 muestra los valores estándar y la fórmula de la ROE [22].



IMPLEMENTACIÓN DE TRANSECTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1

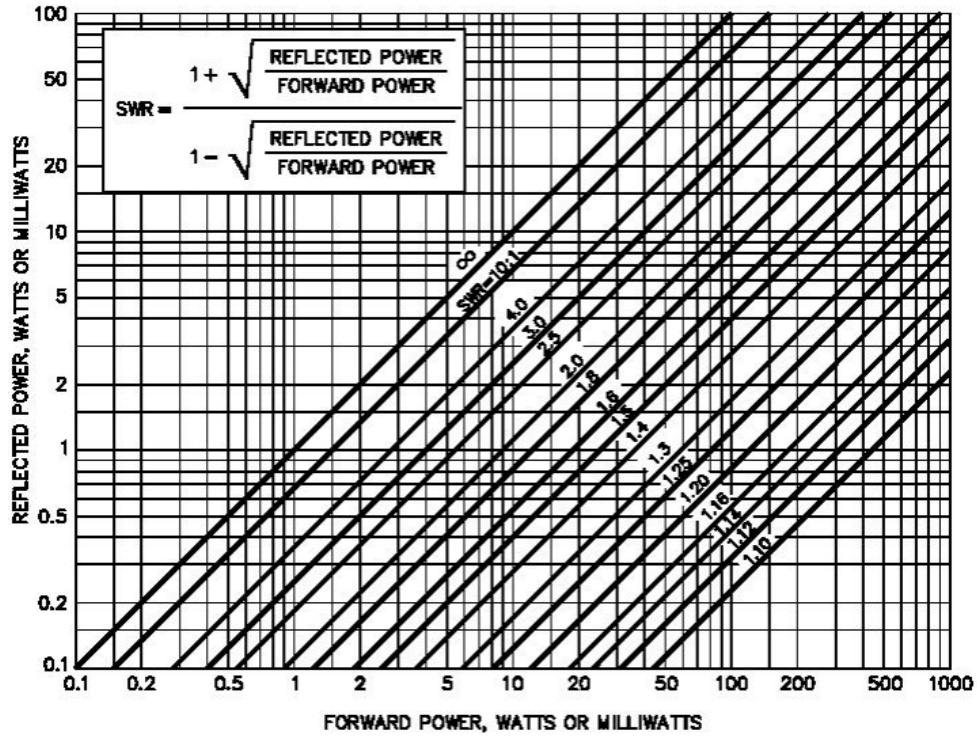


Figura 8.16. Valores estándar de ROE.

En el caso del transector es posible trabajar con ROE de máximo 1:3, puesto que para una potencia de 100%, 75% será emitida y 25% reflejada.

Para las pruebas de potencia transmitida y reflejada se utilizó un medidor de potencia VHF/UHF llamado MFJ-847 (Figura 8.17) que alcanza potencias de 0-120 W, con este dispositivo es posible obtener la medición de ROE y ambas potencias (transmitida y reflejada).



Figura 8.17. Medidor de potencia MFJ-847.



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

98

A continuación se describen los pasos a seguir para conectar el medidor de potencia y medir ambas potencias.

En primer lugar se remueve el dispositivo para alimentación remota por coaxial DCC 5000 pro acoplado a la antena primaria del GS100. Posteriormente, la entrada Tx del medidor de potencia se conecta a la línea de transmisión del transceptor. La entrada ANT del MFJ-847 se conecta a la carga fantasma correspondiente (430-440 MHz). En la Figura 8.18 se muestran las conexiones dentro del GS100.

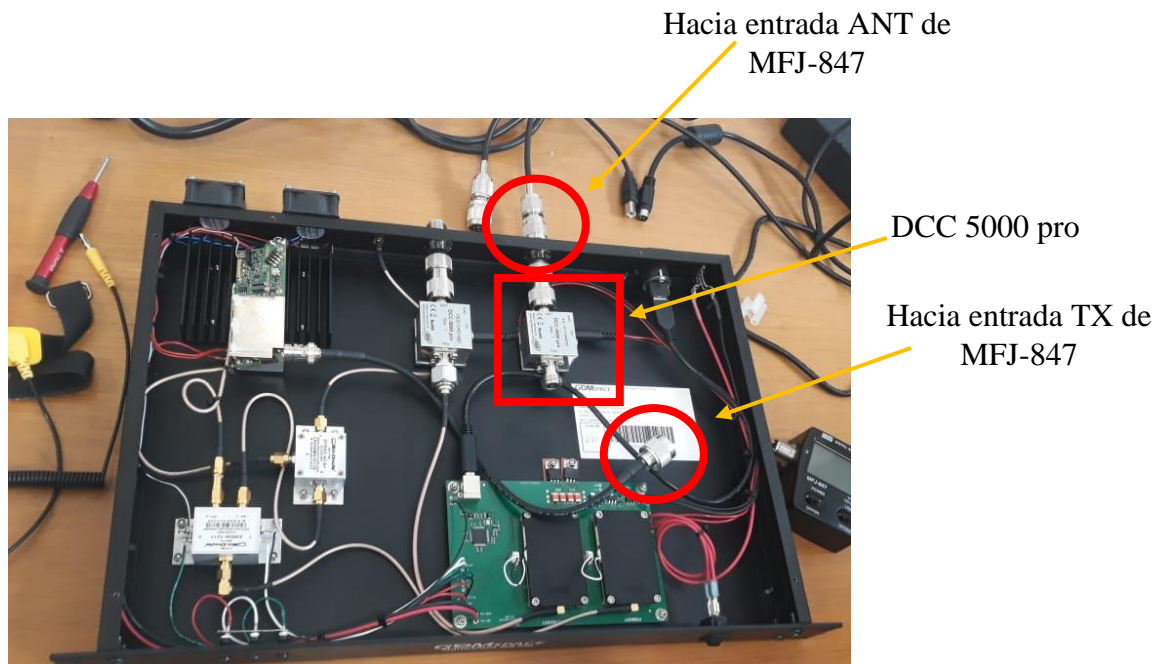


Figura 8.18. Conexiones entre GS100 y MFJ-847.

Es muy importante que en el momento de realizar pruebas de transmisión con un transceptor se coloque una carga fantasma en la salida hacia la antena, para evitar que el transmisor cause interferencias electromagnéticas con otros transceptores y también para evitar que el equipo se dañe. La Figura 8.19 muestra la conexión del transceptor al medidor de potencia y a la carga fantasma.



IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1

99

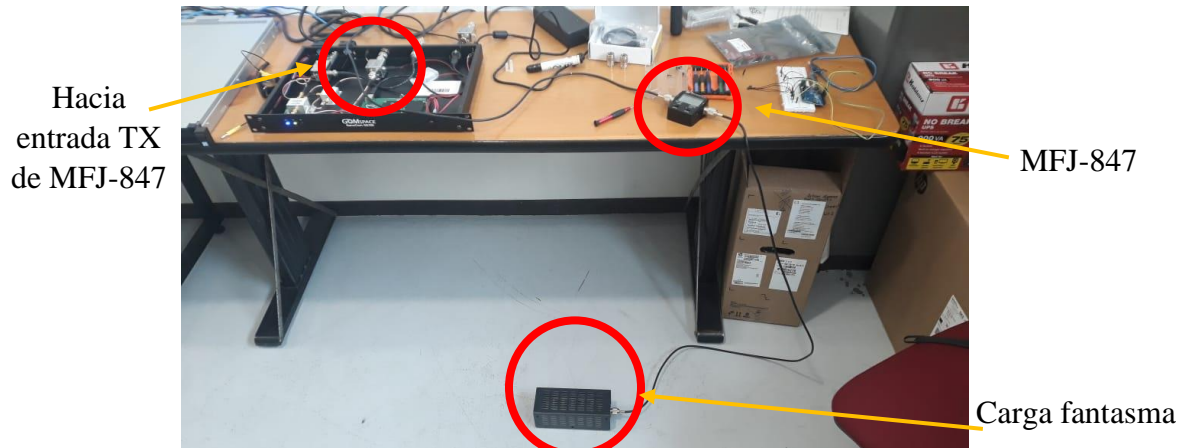


Figura 8.19. Conexiones para prueba de medición de potencia

Una vez realizadas las conexiones se enciende el GS100 junto con la computadora MS-100 y el medidor de potencia. Para comprobar cuál era la potencia mínima y máxima del GS100 fue preciso configurar la Tabla 0 del AX100 como se mencionó en el subtema anterior, en este caso los parámetros configurados fueron.

tx_pwr 0: para potencia mínima

tx_pwr 3: para potencia máxima

De acuerdo al manual de usuario del GS100 la potencia de salida de éste es de 25 Watts. En la Figura 8.20 se presenta la medición de la potencia mínima de transmisión, en donde la potencia transmitida es 23.66 Watts, la potencia reflejada de 0.69 Watts y el ROE de 1.42.



Figura 8.20. Potencia mínima transmitida.



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

100

La medición de potencia máxima transmitida arrojó los mismos resultados (Figura 8.21), por lo que se concluyó que la potencia de salida del transeptor era apta para enlazar con el AzTechSat-1, ya que de acuerdo con el link budget calculado es posible enlazar con el satélite



desde 2.2 W.

Figura 8.21. Potencia máxima transmitida.



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*



CAPÍTULO IX

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Un análisis detallado de la implementación del transector en el segmento terrestre ha sido descrito. Por lo cual, en el presente capítulo se presentan los resultados y conclusiones de dicha implementación, demostrando que la comunicación entre el AzTechSat-1 y el transector GS100 ha funcionado mediante los telecomandos y sus respuestas.

9.1 RESPUESTAS DE TELECOMANDOS ENVIADOS DESDE LA ESTACIÓN TERRENA

En los capítulos anteriores se describieron los comandos establecidos para ejecutar algunas operaciones en el nanosatélite. En este apartado se presentan los resultados establecidos en el transector.

La Figura 9.1 se observa que dentro del MS100 en la ruta: Aztech-Sat/MS100/build se encuentran los archivos descargados del HK. Es importante recordar que se utilizó el protocolo de transferencia de archivos ftp (por sus siglas en inglés) para descargar el beacon, el cual está compuesto de 0-144 HK, el tiempo aproximado para la descarga del archivo es de 17 segundos.



IMPLEMENTACIÓN DE TRANSECTOR EN EL SEGMENTO TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1

104

```
ms100: ~/Aztech-Sat/MS100/build
ms100@ms100:~$ cd Aztech-Sat/
ms100@ms100:~/Aztech-Sat$ ls
Flight-Software Ground-Segment Ground-Station MS100 Test1 a.c a.out libfnc
ms100@ms100:~/Aztech-Sat$ cd MS100/
ms100@ms100:~/Aztech-Sat/MS100$ ls
CHANGELOG README.md build client clients doc eclipse.py eclipse.pyc lib obj src waf wsc
ms100@ms100:~/Aztech-Sat/MS100$ waf build
Waf: Entering directory '/home/ms100/Aztech-Sat/MS100/build'
Waf: Leaving directory '/home/ms100/Aztech-Sat/MS100/build'
'build' finished successfully (0.090s)
ms100@ms100:~/Aztech-Sat/MS100$ waf build
Waf: Entering directory '/home/ms100/Aztech-Sat/MS100/build'
Waf: Leaving directory '/home/ms100/Aztech-Sat/MS100/build'
'build' finished successfully (0.038s)
ms100@ms100:~/Aztech-Sat/MS100$ cd build
ms100@ms100:~/Aztech-Sat/MS100/build$ ls
beacon_1559669731 csp_term hk_files_1559701506 hk_files_1559717079
beacon_1559670331 hk_files.txt hk_files_1559702106 hk_files_1559717080
beacon_1559673289 hk_files_1559687706 hk_files_1559702706 hk_files_1559718280
beacon_1559673515 hk_files_1559688306 hk_files_1559703306 hk_files_1559718800
beacon_1559676055 hk_files_1559688907 hk_files_1559703906 hk_files_1559719480
beacon_1559724880 hk_files_1559689507 hk_files_1559704506 hk_files_1559720080
beacon_1559725480 hk_files_1559690107 hk_files_1559705106 hk_files_1559720680
beacon_1559726080 hk_files_1559690706 hk_files_1559705706 hk_files_1559721280
beacon_1559727280 hk_files_1559691305 hk_files_1559706306 hk_files_1559721880
beacon_1559727880 hk_files_1559691905 hk_files_1559706906 hk_files_1559722480
beacon_1559727880.csv hk_files_1559692505 hk_files_1559707506 hk_files_1559723080
beacon_1559728480.csv hk_files_1559693105 hk_files_1559708106 hk_files_1559723680
beacon_1559729080.csv hk_files_1559693705 hk_files_1559708706 hk_files_1559724280
beacon_1559730880.csv hk_files_1559694305 hk_files_1559709306 hk_files_1559724880
beacon_1559731480.csv hk_files_1559694905 hk_files_1559709906 hk_files_1559725480
beacon_1559732080.csv hk_files_1559695505 hk_files_1559710506 hk_files_1559726080
beacon_18446744072534934568 hk_files_1559696105 hk_files_1559711106 hk_files_1559726680
beacon_18446744072534934805 hk_files_1559696705 hk_files_1559711706 hk_files_prueba.txt
beacon_18446744073709551615 hk_files_1559697305 hk_files_1559712306 include
beacon_892219952 hk_files_1559697905 hk_files_1559712906 lib
c4che hk_files_1559698505 hk_files_1559713506 nanonid.bin
client hk_files_1559699106 hk_files_1559714106 param-1-0.bin
clients hk_files_1559699706 hk_files_1559714706 param-5-S.bin
config.log hk_files_1559700306 hk_files_1559715306 screenlog.0
ms100@ms100:~/Aztech-sat/MS100/build$
```

Figura 9.1. Descarga de beacon

En las siguientes imágenes se muestran los comandos programados desde la estación terrena, y también se muestran las respuestas a cada telecomando seleccionado, para poder corroborar que el CubeSat realmente está recibiendo el telecomando seleccionado y está ejecutando una acción. Para mandar un comando hacia el nanosatélite es importante haber ingresado a csp-term en la computadora MS100, como se mencionó en el capítulo de sistema de pruebas.

En la Figura 9.2 se muestra el telecomando hkra (HK-RA), el cual es el encargado de descargar el HK desde el CubeSat hacia las estaciones de radioaficionados, por lo cual en la parte de telemetría la respuesta a dicho comando es Fs1, de acuerdo a las tablas de comandos presentadas en el capítulo VII. El comando en csp-term para enviar el telecomando es: **satup hkra**.



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

La Figura 9.4 presenta la lista de telecomandos shutdown1 (SHUTDOWN SAT 1), shutdown2 (SHUTDOWN SAT 2), shutdown3 (SHUTDOWN SAT 3), cuya tarea principal es activar la primera bandera para apagar/encender el CubeSat, activar la segunda bandera para apagar el CubeSat y activar la tercera bandera para apagar el CubeSat respectivamente. Esto fue pensado con la finalidad de estar completamente seguros del momento en el que se requiere apagar el CubeSat. También se presentan las respuestas a cada telecomando enviado. Los comandos desde csp-term son: **satup shutdown1, satup shutdown2, satup shutdown3**.

```
MS100: ~/Aztech-Sat/MS100/build
stingrc1          STINGER CYCLE 1
setstingrcycle   SET STINGR CYCLE
stingroff        Shutdown STINGR
stingron         Turn on STINGR
resetstingr      RESET STINGR
settime          Actualiza la hora del satellite
shutdown1        SHUTDOWN SAT 1
shutdown2        SHUTDOWN SAT 2
shutdown3        SHUTDOWN SAT 3
resetmo          RESET MO
test             test
csp-term # satup stingroff
csp-term #
TELEMETRIA: LFR

csp-term # satup stingron
csp-term #
TELEMETRIA: Af4

csp-term # satup shutdown1
csp-term # satup shutdown1
csp-term #
TELEMETRIA: 5Ds4cR
TELEMETRIA: No me siento bien señor Stark . . .
TELEMETRIA: 5Ds4cR
TELEMETRIA: No me siento bien señor Stark . . .
csp-term # satup shutdown2
csp-term #
TELEMETRIA: sd5Rf8
TELEMETRIA: No me quiero ir señor Stark :(
csp-term # satup shutdown3
csp-term #
TELEMETRIA: NS4M16
TELEMETRIA: . . . . .
csp-term #
csp-term #
```

Figura 9.4. Pruebas telecomandos: shutdown1, shutdown2, shutdown3

Finalmente, con el comando **ftp** (File Transfer Protocol) es posible descargar el archivo HK localizado en la memoria de la OBC (Nanomind A3200) hacia la memoria del MS100. El comando utilizado es: **ftp download file /flash/hk_files.txt** (Figura 9.5).



IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1

107

```
csp-term #
csp-term #
csp-term # ftp
ls                list files
rm                rm files
mkfs             make file system
mkdir           make directory in file system
rmdir          remove a directory from the file system
mv             move files
cp            copy files
zip          zip file
unzip       unzip file
server      set host and port
backend     Set filesystem backend
upload_file Upload file
download_file Download file
upload_mem  Upload to memory
download_mem Download memory
timeout     Get or Set general ftp timeout
csp-term # ftp download_file
usage: download_file <remote filename> [local filename]
csp-term # ftp ls /flash/
 4.0B t_pasado.txt
 2.0B eclipse.txt
 0.0B antennas.txt
 2.0B index_hk.txt
14.3K hk_files.txt
 2.3K hk_files2.txt
 1.0B pyl_cycle.txt
 1.0B pyl_auto.txt
332.8K nanomind.bin
 1.0B stingr_toggle.txt
 1.0B toggle.txt
csp-term #
csp-term #
csp-term # ftp download_file
usage: download_file <remote filename> [local filename]
csp-term # ftp download_file /flash/hk_files.txt
File size is 14601
Checksum is 0x9d0b7002
hk_files.txt already exists
Could not execute command 'ftp download_file /flash/hk_files.txt', error -1
csp-term #
```

Figura 9.5. Prueba comando ftp download file /flash/hk_files.txt

9.2 DISCUSIÓN

Las pruebas realizadas para demostrar la comunicación entre la estación terrena y el AzTechSat-1 fueron exitosas, aunque se presentó un inconveniente al momento de la recepción de datos en la estación terrena debido al preamplificador. La causa del problema fue detectada, el preamplificador debe estar en posición vertical y permanecer en la misma posición para evitar pérdidas y afectación en los mensajes recibidos, por lo cual se llevó a cabo una fijación del preamplificador para evitar que posibles errores se presenten cuando la misión empiece.



9.3 CONCLUSIONES

La estación terrena en UPAEP es funcional y operativa, por lo que debería ser capaz de mantener un enlace de comunicación con el AzTechSat-1. La implementación del transceptor GS100 fue indispensable para la comunicación exitosa, puesto que al ocupar el mismo radio que el CubeSat la compatibilidad y programación tanto del nanosatélite como de la estación terrena fueron más fáciles y claras, además de que el tiempo invertido se redujo en comparación con las pruebas fallidas realizadas con el transceptor anterior. Además, el desarrollo de esta tesis fue creado para facilitar a futuras generaciones la comprensión del funcionamiento de una estación terrena y más concretamente el funcionamiento y utilidad de un transceptor en ella. Finalmente se puede concluir que la estación terrena esta lista para operar en la misión y el transceptor es capaz de demodular y decodificar los mensajes, así como también es capaz de enviar telecomandos hacia el AzTechSat-1 y de esta manera establecer comunicación exitosa con él.

9.4 TRABAJO FUTURO: PLAN DE OPERACIÓN DE LA RADIO COMUNICACIÓN

Es importante establecer un plan de operación, para que al momento de la misión los operadores de la estación terrena sean capaces de tener un buen manejo de ella. A continuación, se presentan los pasos a seguir en la operación de la misión [23].

- 1) Hacer inspección visual de equipos.
- 2) Revisar la conexión de todo el sistema (MS100, monitor, GS100, antena).
- 3) Encender MS100.
- 4) Ingresar a la Terminal. Al momento de entrar aparece **ms100@ms100:~\$**, es decir que se ha ingresado al MS100.
- 5) Dentro del MS100 checar que **csp-doppler** y **csp-term** estén corriendo **ms100@ms100:~\$ tmux ls**



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

- 6) Checar que todos los servicios estén corriendo.



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

109

```
ms100@ms100:~$ systemctl list-units gs_*
```

- 7) Conectar al servicio csp-term

```
ms100@ms100:~$ tmux a -t csp-term
```

Y confirmar que es posible hacer ping a ambos AX100

```
csp-term # ping 29
```

```
csp-term # ping 30
```

- 8) Una vez afuera de csp-term, ingresar el siguiente comando para entrar al AX100 primario, en la terminal tio, no minicom.

```
ms100@ms100:~$ tmux a -t ax100_primary
```

- 9) Una vez dentro del AX100 primario, revisar que la configuración de la tabla de configuración del sistema se encuentre con los parámetros correctos, es decir: tx_inhibit en cero, tx_pwr en mínimo=1 y csp_rtable "0/0 AX100, 28/5 KISS". Si algún dato está mal, con el parámetro <set> modificarlo.

```
nanocom-ax # param mem 0
```

```
nanocom-ax # param list
```

```
nanocom-ax # param set tx_inhibit 0
```

```
nanocom-ax # param set tx_pwr 0
```

```
nanocom-ax # param set csp_rtable "0/0 AX100, 28/5 KISS"
```

```
nanocom-ax # param save 0 0
```

- 10) Revisar configuración de la tabla 1 (ver Tabla 1: Configuración del Receptor, del manual del AX100), que es la tabla de recepción con los parámetros deseados. Si algún dato está mal, con el parámetro <set> modificarlo.

```
nanocom-ax # param mem 1
```

```
nanocom-ax # param list
```

```
nanocom-ax # param set freq 437300000
```

```
nanocom-ax # param set baud 9600
```

```
nanocom-ax # param set modindex 0.5
```



```
nanocom-ax # param set mode 5
nanocom-ax # param set csp_hmac false
nanocom-ax # param set csp_rs true
nanocom-ax # param set csp_crc true
nanocom-ax # param set csp_rand false
nanocom-ax # param set ax25_call XE1SCL
nanocom-ax # param save 1 1
```

- 11) Revisar configuración de la tabla 5 (ver Tabla 5: Configuración del Transmisor, del manual del AX100), que es la tabla de transmisión con los parámetros deseados. Si algún dato está mal, con el parámetro <set> modificarlo.

```
nanocom-ax # param mem 5
nanocom-ax # param list
nanocom-ax # param set freq 435400000
nanocom-ax # param set baud 9600
nanocom-ax # param set modindex 0.5
nanocom-ax # param set mode 5
nanocom-ax # param set csp_hmac false
nanocom-ax # param set csp_rs true
nanocom-ax # param set csp_crc true
nanocom-ax # param set csp_rand false
nanocom-ax # param set ax25_call XE1SCL
nanocom-ax # param save 5 5
```

- 12) Hacer ping 5 desde el AX100 primario para comprobar comunicación con el AX100 a bordo.

```
nanocom-ax # ping 5
```

- 13) Para poder depurar la comunicación y el enrutamiento entre nodos csp se pueden utilizar cualquiera de los siguientes comandos:

```
nanocom-ax # log list
```



nanocom-ax # log print csp I

nanocom-ax # debug csp i

nanocom-ax # debug csp all

- 14) Una vez que se ha comprobado la comunicación entre el AX100 primario, se procederá a comprobar la comunicación desde la aplicación csp-term, la cual previamente se ha programado y compilado, se accederá a la siguiente ubicación:

/home/Aztech-Sat/MS100/build/

ms100@ms100 # cd /home/Aztech-Sat/MS100/build/

- 15) Se ejecutará la aplicación csp-term el cual funge como una dirección de csp tal y como lo hacen los módulos de GomSpace pero la gran ventaja de csp-term es que puede ser programado para enviar comandos, recibir información y procesarla de tantas maneras como su SDK, escrito en C, nos lo permita.

ms100@ms100 # ./csp-term

- 16) Al ejecutar la aplicación de csp-term estaremos en una nueva terminal la cual nos permitirá realizar diversas funciones, algunas desarrolladas por la empresa GomSpace y otras desarrolladas por los equipos de Ground Segment y Flight Software con ayuda del SDK. A continuación se muestran los comandos disponibles

csp-term # (Figura 9.6)



IMPLEMENTACIÓN DE TRANSECTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1

112

```
csp-term #
ping          csp: Ping
rps           csp: Remote ps
memfree       csp: Memory free
buffree       csp: Buffer free
reboot        csp: Reboot
shutdown      csp: Shutdown
uptime        csp: Uptime
cmp           csp: Management
route         csp: Show routing table
ifc           csp: Show interfaces
conn          csp: Show connection table
rdpopt        csp: Set RDP options
help          gosh: Show help
sleep         gosh: Sleep X ms
watch         gosh: Run cmd at intervals, abort with key
batch         gosh: Run multiple commands
exit          gosh: Exit program
vmem          gosh: Virtual memory
shell         gosh: Remote shell commands
ftp           ftp: File transfer protocol
rparam        param: Remote Param
param         param: Local
log           log: Log system
debug         log: Alias of 'log print'
satdown       Telemetry
satup         Telecommands
ax100         client: AX100
eps           client: EPS
```

Figura 9.6. Comandos disponibles de csp-term.

17) Posteriormente para poder enviar un mensaje desde el segmento terrestre hacia el segmento espacial existe el comando “satup” (Figura 9.7) el cual se debe ejecutar en conjunto con uno de los siguientes subcomandos.

csp-term # satup

```
csp-term # satup
settime       Actualiza la hora del satellite
stingrc1      STINGER CYCLE 1
stingroff     Shutdown STINGR
stingron      Turn on STINGR
adcs1         ADCS1
adcs2         ADCS2
setupuhf      SETUP UHF
hkra          HK-RA
resetmo       RESET MO
setstingrcycle SET STINGR CYCLE
RSSI          RSSI
resetstingr   RESET STINGR
shutdown1     SHUTDOWN SAT 1
shutdown2     SHUTDOWN SAT 2
shutdown3     SHUTDOWN SAT 3
```

Figura 9.7. Comando satup.



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

Es posible consultar el documento “Telemetry” (disponible en el Drive de Ground Segment/Revisiones NASA/SIR/Telemetry210519) para conocer más a detalle la función de cada uno de los comandos de telemetría

- 18) Cuando se ejecuta alguno de los comandos de telemetría, siempre y cuando el equipo físico como antena, preamplificador y rotor se encuentren operando satisfactoriamente el satélite recibirá un paquete con información desde la estación terrena y en forma de confirmación enviará hacia el segmento terrestre una respuesta (Figura 9.8)

```
csp-term # satup adcs1
csp-term #
TELEMETRIA: 4cR♦♦
```

Figura 9.8. Respuesta enviada desde el satélite hacia estación terrena.

- 19) Por otro lado, para descargar información del satélite a la computadora de la estación terrena se accederá a la memoria no volátil de la tarjeta A3200 (OBC) por medio de un comando en csp-term (Figura 9.9)

csp-term# ftp ls /flash

```
csp-term # ftp ls /flash
3.0B t_pasado.txt
0.0B antennas.txt
1.0B index_hk.txt
1.0B pyl_auto.txt
224.0B hk_files.txt
```

Figura 9.9. Comando para descargar información del satélite.

- 20) Posteriormente, una vez que se conoce el nombre del archivo, ubicado en la memoria flash, se ejecuta el siguiente comando para descargar el estado de salud del satélite (Figura 9.10)

csp-term# ftp download_file /flash/hk_files.txt

```
csp-term # ftp download_file /flash/hk_files.txt
File size is 224
Checksum is 0x2b773959
Transfer Status: 0 of 2 (0.00%)
100.0% [#####] (2/2)
CRC Remote: 0x2b773959, Local: 0x2b773959
```

Figura 9.10. Comando para descargar estado de salud del satélite.



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

114

- 21) Finalmente, para terminar de ejecutar el programa csp-term se oprimen las teclas Ctrl+C; con ello se finalizará la comunicación entre el MS100 y todos los nodos de csp tanto del segmento terrestre como espacial.

Con este plan de operación se espera que los encargados de operar la estación terrena sean capaces de llevar un manejo controlado de dicha estación y no poner en riesgo la misión principal del AzTechSat-1.



GLOSARIO

Orbita: Curva que describe un cuerpo alrededor de otro en el espacio, especialmente un planeta, cometa, satélite etc., como consecuencia de la acción de la fuerza de gravedad. [24]

Codificación / Decodificación: En la codificación el emisor convierte el mensaje en signos que puedan ser recibidos y entendidos por el receptor. En la decodificación el receptor convierte los signos que le llegan en un mensaje. De esta forma los signos son asociados a las ideas que el emisor trató de comunicar. [25]

Encriptar: Encriptar o cifrar una información es ocultar un mensaje con una contraseña. Desde un punto de vista informático consiste en aplicar un algoritmo asociado a una o varias contraseñas, que convierte la información en una cadena de letras, números y símbolos sin sentido. [26]

Modular / Demodular: Modular se refiere a variar el valor de la amplitud, frecuencia o fase de una portadora en función de una señal. Demodular se refiere a extraer la información contenida en una señal modulada. [24]

Multiplexación/ Demultiplexación: La multiplexación es la técnica de combinar dos o más señales, y transmitir las por un solo medio de transmisión usando un dispositivo llamado multiplexor. El proceso inverso se conoce como demultiplexación. [27]

FreeRTOS: FreeRTOS Es un sistema operativo de tiempo real kernel para dispositivos embebidos que ha sido portado a 35 plataformas de microcontrolador. Está distribuido bajo el MIT Licencia. [28]

POSIX: **P**ortable **O**perating **S**ystem **I**nterface, y **X** viene de UNIX, es una norma escrita por la IEEE, que define una interfaz estándar del sistema operativo y el entorno, incluyendo un intérprete de comandos o shell. [29]



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

117

ARM: ARM es una arquitectura RISC (Reduced Instruction Set Computer = Ordenador con Conjunto Reducido de Instrucciones) de 32 bits y de 64 Bits, desarrollada por ARM Holdings. [30]

AVR32: El AVR32 es una arquitectura de microcontrolador RISC de 32 bits producida por Atmel . Atmel ha cambiado principalmente a M variantes de la arquitectura ARM. [31]

I2C: I2C significa Circuito Interintegrado (Por sus siglas en Inglés Inter-Integrated Circuit) es un protocolo de comunicación serial desarrollado por Phillips Semiconductors. Básicamente se creó para poder comunicar varios chips al mismo tiempo dentro de los televisores. [32]

CAN: Controller Area Network es un protocolo de comunicaciones basado en una topología bus para la transmisión de mensajes en entornos distribuidos. Además ofrece una solución a la gestión de la comunicación entre múltiples CPUs (unidades centrales de proceso). [33]

SPI: Serial Peripheral Interface, es un estándar de comunicaciones para controlar dispositivos electrónicos digitales que acepten flujos de bits en serie con comunicación síncrona. [34]

RS-232: Recommended Standard 232, interfaz para el intercambio de datos binarios serie entre un equipo de terminal de datos (computadora) y un equipo de comunicación de datos (módem). [35]

HDLC: High Level Data Link Control, protocolo de comunicaciones de propósito general de punto a punto a nivel de enlace de datos. [36]

FCS: Frame Check Sequence, conjunto de bits adjuntos al final de la trama cuyo propósito es verificar la integridad de la información recibida mediante CRC o checksum. [37]

DECT: Digital Enhanced Cordless Telecommunications, o en español telecomunicaciones inalámbricas mejoradas digitalmente, es un estándar para teléfonos inalámbricos digitales, y



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSECTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

118

puede ser utilizado para transferencias de datos inalámbricas; su radio de operación es de 25-100 metros. [38]

Heterodino: Receptor que mezcla dos frecuencias en un dispositivo no lineal o traslada una frecuencia a otra usando mezcla no lineal. [24]

USART: Circuito integrado para comunicaciones de un sistema de cómputo, traduce los datos de paralelo a serial para ser transmitidos, pueden comunicarse de manera síncrona y asíncrona. En cambio UART significa Receptor/Transmisor asíncrono universal. [39]

GOSH: Gomspace Shell. El Shell (armazón) incluye una interfaz completa con todos los comandos necesarios para configurar y operar los equipos. [40]

ESD: Electrostatic Discharge. Descarga electrostática.

SDK: Software Development Kit. Kit de desarrollo de software.

MMIC: Monolithic Microwave Integrated Circuits. Circuitos integrados cuya operación es a la frecuencia de microondas (300 MHz-300 GHz), las entradas y salidas tienen impedancia de 50 ohmios. [41]

SMD: Surface Mount Device. Dispositivos de montaje superficial.

QSL: Código que significa “confirmo la recepción”. Las emisoras de radio envían tarjetas QSL cuando los oyentes emiten un informe de recepción correcta de las emisiones hechas. [42]

AMSAT: Amateur Satellite. Satélite Aficionado es la asociación mundial de satélites de radioaficionados, también es conocida como Radio Amateur Satellite Corporation. Su principal objetivo es fomentar la participación de los radioaficionados en la comunicación e investigación espacial. [43]

Apogeo: Punto de una órbita en torno a la Tierra más separado del centro de esta. [24]



*IMPLEMENTACIÓN DE TRANSECTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1*

119

KISS: Keep It Simple Stupid. Protocolo de comunicación para combinar características en un solo dispositivo y estandarizar comunicaciones a través de enlace serial síncrono. [44]

Cargas fantasmas: Dispositivos utilizados para sustituir antenas y simular cargas eléctricas para evitar transmisiones indeseables y daños en el equipo. Son usadas generalmente en pruebas o mediciones. [45]

CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance. Acceso múltiple con detección de portadora y prevención de colisiones.

LNA: Low-Noise Amplifier. Amplificador de bajo ruido.

UHF: Ultra-High Frequency. Frecuencia Ultra-Alta.

OBC: On Board Computer. Ordenador de a bordo.



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

REFERENCIAS

- [1] TORRES, J. (2010). “*Nanosatélites, microsateélites y minisateélites: una alternativa de futuro*”. Departamento de Programas Espaciales y Ciencias del Espacio. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), España.
- [2] SKROBOT, G., COEHLO, R. (2012). “*ELaNa - Educational Launch of Nanosatellite Providing Routine RideShare Opportunities*”. NASA Kennedy Space Center; Cocoa Beach, FL, United States. SSC-V-5, KSC-2012-197, KSC-2012-197R.
- [3] CUBESAT (2014). “*CubeSat Design Specification*”. CubeSat Design Specification Rev. 13 The CubeSat Program, Cal Poly SLO
- [4] MARTÍNEZ, R. (2010). “*Tipos de órbitas. Constelaciones de satélites*”. ETSI de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid.
- [5] CORI, J. (2012). “*Satélites y plataformas de adquisición de datos, caracterizaciones, comparaciones, principales aplicaciones y dos ejemplos de aplicación*”. Universidad mayor de San Andrés. Facultad de tecnología. La Paz: Bolivia.
- [6] JOSKOWICZ, J. (2015). “*Breve Historia de las Telecomunicaciones*”. Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería Universidad de la República Montevideo, Uruguay.
- [7] TORRES, J. P. (2012). “*Efecto Doppler*”. Departamento de Astronomía Universidad de Guanajuato DA-UG, México.
- [8] ITU. (2015). “*Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones*”. Serie V. Recomendación UIT-R V.431-8.
- [9] L3 COMMUNICATIONS. (2010). “*Telemetry Tutorial*”. L-3 Communications Telemetry West 9020 Balboa Avenue San Diego.



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSECTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

122

- [10] HERRERA, J. (2015). “*Modulación y Codificación Digital - Análogo (ASK, FSK & PSK)*”. Instituto Especializado de Estudios Superiores Loyola.
- [11] ALMINDE.L. K. (2017). “*Software Frameworks for Rapid Mission Development*”. Denmark. GomSpace Aps.
- [12] GOMSPACE APS (2017). “*NanoCom AX100. AX100 Manual. Software Documentation v3.7*”. Denmark. pp. 30-32.
- [13]CCSDS. (2017). “*TM Synchronization and Channel Coding. Recomendación for Space Data System Standards*”. CCSDS 131.0-B-2. Blue Book. Issue 2. Washington, D.C.: CCSDS.
- [14] GEREZ, S. H. (2013). “*Implementation of Digital Signal Processing: Some Background on GFSK Modulation*”. University of Twente, Department of Electrical Engineering.
- [15] GARCÍA, L., FLORES, A., et al. (2019). “*AztechSat-1. Ground Segment: System Integration Review. AZT_SIR_DF_GS_SIR_0.3*”. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Puebla, México. Reporte Interno.
- [16] (2019). “*AzTechSat-1 Technical Requirements Table*”. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Puebla, México. Reporte Interno.
- [17] KING, J. (2018). “*AMSAT / IARU Annotated Link Model System*”. Versión: 2.5.3.
- [18] GARCÍA, L., FLORES, J.R. (2019). “*Telemetry*”. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Puebla, México. Reporte Interno.
- [19] (2019). “*Diccionario de datos*”. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Puebla, México. Reporte Interno.



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

123

- [20] GOMSPACE A/S (2018). “*NanoCom MS100 Manual. A practical guide to server configuration and usage*”. gs-man-nanocom-ms100-3.1. Denmark.
- [21] GOMSPACE A/S (2018). “*NanoCom GS100 Datasheet. Dual-radio ground station solution for NanoCom AX100*”. gs-man-nanocom-gs100-2.0. Denmark.
- [22] FLORES, A., DORANTES, R. (2019). “*Potencia de Transmisión GomSpace NanoCom GS100*”. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Puebla, México. Reporte Interno.
- [23] CONTRERAS, S., CAMPECHE, A., FLORES, J.R. (2019). “*Plan de Operación GS*”. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Puebla, México. Reporte Interno.
- [24] Real Academia Española. (2018). “*Diccionario de la lengua española*”. Madrid, España.
- [25] HALL, S. (1980). “*Cultura, media y lenguaje*”. Recuperado de felsemiotica.com
- [26] CUNNINGHAM, A. (2015). “*Phone and laptop encryption guide: Protect your stuff and yourself*”. ARS TECHNICA.
- [27] CERÓN, M. (2011). “*Multiplexación*”.
- [28] KOLESNIK, S. (2013). “*Comparing microcontroller real-time operating systems*”. Embedded.
- [29] IEEE. (2001). “*POSIX - Austin Joint Working Group*”. Recuperado de: https://standards.ieee.org/standard/1003_1-2001.html
- [30] HACHMAN, M. (2002). “*ARM Cores Climb Into 3G Territory*”. ExtremeTech.
- [31] ATMEL. (2016). “*AVR32 Linux project*”. Way back machine.
- [32] DAVIS, L. (2016). “*I2C Bus/Access Bus*”. Recuperado de http://www.interfacebus.com/Design_Connector_I2C.html



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSCEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

124

- [33] NATIONAL INSTRUMENTS. (2019). “Introducción a CAN”. Recuperado de:
<https://www.ni.com/es-mx/innovations/white-papers/06/controller-area-network--can--overview.html>
- [34] KALINSKY, D. (2002). “*Introduction to serial peripheral interface*”. Embedded.
- [35] SANTOS, M. (2007). “*Sistemas Telemáticos*”. Madrid: RA-MA Editorial.
- [36] FAIHURST, G. (2001). “*High Level Link Control (HDLC) Protocol*”. Recuperado de:
<https://erg.abdn.ac.uk/users/gorry/eg3567/dl-pages/hdlc.html>
- [37] IEEE. (2012). “*Packet format*”, 802.3-2012 - IEEE Standard for Ethernet. IEEE Standards Association
- [38] DECT. Forum. Swizerland. Website: www.dect.org
- [39] (2007). “Transmisión serial USART”. Maxembedded.
- [40] GOMSPACE ApS (2011). “*Anexo I. Datasheets de los principales equipos embarcados*”. Denmark.
- [41] MEDLEY M. (1993). “*Microwave and RF Circuits. Analysis, synthesis and design*”. Artech House.
- [42] UIT. (1959). “*Reglamento de radiocomunicaciones*”. Secretaria General de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. Ginebra.
- [43] AMSAT. (2019). “Radio Amateur Satellite Corporation”. Kensington, MD 20895-2526 USA.
- [44] CHEPPONIS, M., KARN, P. (1987). “*The KISS TNC: A simple Host-to-TNC communications protocol*”. ARRL 6th Computer Networking Conference. Redondo Beach CA.



**IMPLEMENTACIÓN DE TRANSEPTOR EN EL SEGMENTO
TERRESTRE DEL NANOSATÉLITE AZTECHSAT-1**

125

[45] KLEINSCHMIDT, K. (1990). “*ARRL Handbook for the Radio Amateur*”. Newington, Connecticut: American Radio Relay League. pp. 25-21 through 25-23