



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
ELÉCTRICA - TELECOMUNICACIONES

ANÁLISIS, SELECCIÓN, ADAPTACIÓN PARA VUELO ESPACIAL Y SOFTWARE  
DE OPERACIÓN BÁSICO DE SISTEMA DE COMUNICACIONES DE BAJADA EN  
BANDA “S” PARA NANOSATÉLITE UNIVERSITARIO

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ALEJANDRO MERIDA PEREZ

TUTOR PRINCIPAL  
DR. LUIS MANUEL RODRIGUEZ MENDEZ, ESIME-IPN

MÉXICO, D. F. FEBRERO 2016

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. José María Matías Maruri

Secretario: Dr. José Ismael Martínez López

Vocal: Dr. Luis Manuel Rodríguez Méndez

1<sup>er.</sup> Suplente: Dr. Salvador Landeros Ayala

2<sup>d o.</sup> Suplente: Dr. Víctor García Garduño

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: IINGEN, UNAM  
ESIME ZACATENCO, IPN

**TUTOR DE TESIS:**

DR. LUIS MANUEL RODRIGUEZ MENDEZ

-----  
**FIRMA**

## *Dedicatoria*

A mi madre, que siempre me ha apoyado en todos los proyectos que he emprendido, que se despertaba muy temprano para prepararme el desayuno y pudiera ir a estudiar a la escuela primaria “Niño Campesino”, todavía me acuerdo del ruido de los trastes que se escuchaba en la cocina antes de que cantaran los gallos.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme las puertas y darme la oportunidad de tomar clases en sus aulas.

Al CONACYT por el apoyo económico brindado durante mis estudios de maestría, sin el cual es muy difícil realizar un estudio de este nivel.

A mis amigos de Mixcoac, con los que aprendí que cuando una puerta se cierra otras se abren.

Al Dr. Esaú Vicente Vivas (†) que fue mi tutor durante mis estudios de maestría y que lamentablemente falleció antes de finalizar esta tesis, muchas gracias donde quiera que se encuentre.

Al Dr. Luis Manuel Rodríguez Méndez por sus enseñanzas durante el desarrollo del proyecto y por asesorarme durante la realización de esta tesis.

## INDICE DE CONTENIDO

---

<b>Resumen</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>II</b>
<b>Objetivos de la tesis</b> .....	<b>III</b>
<b>Organización de la tesis</b> .....	<b>III</b>
<b>Índice de tablas</b> .....	<b>V</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>VI</b>
<b>Acrónimos</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Capítulo 1 Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Introducción .....	1
1.2 Estándar CubeSat .....	1
1.3 Componentes utilizados en la construcción de CubeSats.....	2
1.4 Estado del arte .....	3
1.5 Nanosatélite Universitario .....	5
1.6 Bandas de frecuencia utilizadas por el nanosatélite universitario.....	5
<b>Capítulo 2 Comunicaciones satelitales en órbita LEO</b> .....	<b>7</b>
2.1 Introducción .....	7
2.2 Canal de comunicaciones.....	7
2.3 Efecto Doppler.....	8
2.4 Presupuesto de potencia.....	9
2.5 Análisis de potencia recibida, nanosatélite en órbita a 600 km .....	10
2.6 Codificación de canal.....	12
<b>Capítulo 3 Selección y descripción del subsistema de comunicaciones en Banda S</b> .....	<b>14</b>
3.1 Introducción .....	14
3.2 Elementos de la comunicación.....	14
3.2.1 Equipo Terminal de Datos (DTE) .....	15
3.2.2Equipo terminal del circuito de datos (DCE) .....	15
3.3 Transmisores, receptores y módems .....	16
3.4 Algunos Sistemas de comunicaciones en Banda S disponibles en el mercado .....	16

3.4.1 Transmisor ISIS TXS .....	16
3.4.2 Transmisor Clyde Space, modelo CS-CPUT-STX-01 .....	17
3.4.3 Modem Microhard n2420 .....	18
3.5 Selección de sistema en Banda S .....	20
3.6 Hardware del modem n2420 .....	20
3.6.1 UART del n2420.....	22
3.6.2 Etapa del receptor del n2420 .....	22
3.6.3 Mesclador.....	23
3.6.4 Etapa del transmisor .....	24
3.7 Modos de operación del n2420 .....	24
3.7.1 Modo de comando .....	24
3.7.2 Modo datos.....	25
3.8 Registros más importantes del n2420 .....	25
<b>Capítulo 4 Conexión del subsistema en Banda S con otros subsistemas satelitales .....</b>	<b>28</b>
4.1 Introducción .....	28
4.2 Interfaces del modem n2420 .....	29
4.3 Nano Motherboard y sus interfaces .....	32
4.3.1 Puerto de datos (RS232) .....	32
4.3.2 El puerto RS422/485 .....	33
4.4 Computadora de Vuelo .....	33
4.4.1 Microcontrolador TMS570LS1227 .....	34
4.4.2 Microcontrolador MSP430F1612.....	35
4.5 Antena de microcinta rómbica de cruz para Banda S .....	36
4.6 Subsistema de potencia .....	38
4.7 Cámara de percepción remota .....	39
<b>Capítulo 5 Estación terrena .....</b>	<b>40</b>
5.1 Introducción .....	40
5.2 Modem comercial para comunicaciones en Banda S .....	41
5.3 Antena parabólica Banda S .....	42
5.4 Rotores de antena controlados por computadora .....	43
<b>Capítulo 6 Pruebas y adaptaciones al subsistema de comunicaciones en Banda S .....</b>	<b>45</b>
6.1 Introducción .....	45

6.2 Software para la realización de pruebas .....	45
6.2.1Hyperterminal .....	46
6.2.2Realterm.....	46
6.3 Hardware para la realización de pruebas .....	47
6.3.1Sistema de comunicaciones en Banda S .....	48
6.3.2Tarjeta emuladora de computadora de vuelo .....	48
6.3.3Dummy.....	49
6.4 Configuración del modem para pruebas de enlace con hyperterminal .....	49
6.4.1 Pruebas de enlace a 1 Km .....	50
6.4.2 Pruebas de enlace a 10 Km .....	51
6.4.3 Pruebas de enlace a 22 Km .....	52
6.4.3.1Calculo de potencia recibida a 22 Km .....	54
6.4.3.2Mediciones realizadas .....	56
6.5 Modificaciones al Hardware de la nano motherboard .....	60
6.6 Pruebas con Dummy y tarjeta emuladora de computadora de vuelo .....	61
6.7 Pruebas con cámara de percepción remota y computadora de vuelo utilizando el software básico de operación .....	62
<b>Capítulo 7 Software básico de operación para envío de imágenes por Banda S .....</b>	<b>64</b>
7.1 Introducción .....	64
7.2 Protocolos para envío de imágenes .....	64
7.2.1Protocolo Xmodem .....	65
7.2.2Protocolo Kermit.....	66
7.2.3EKermit.....	69
7.3 Implementación del EKermit en el software para descarga de imágenes por Banda S .....	70
<b>Conclusiones .....</b>	<b>72</b>
A.1 Velocidad orbital .....	73
A.2 Modulación GFSK .....	75
A.3 Espectro ensanchado .....	76
A.3.1 Espectro ensanchado por salto de frecuencia.....	77
A.4 Comandos Hayes.....	78

## Resumen

Esta tesis se ocupa de la selección, pruebas de funcionamiento y adaptaciones al hardware y software de un sistema de comunicación en banda S para que funcione como medio de descarga de imágenes satelitales de un nanosatélite universitario, el cual se construye con el objetivo de capacitar a nuevas generaciones de estudiantes en el área aeroespacial y puedan tener a su alcance un nanosatélite que cumpla con el estándar CubeSat.

Adicionalmente, el nanosatélite universitario cuenta con comunicaciones en VHF (Very High Frequency) y UHF (Ultra High Frequency) en bandas de radioaficionado, sin embargo, en banda S es posible disponer de mayor ancho de banda y por lo tanto una mayor velocidad de descarga, fundamental para la transmisión de grandes volúmenes de datos. Las comunicaciones en banda S son direccionales, por lo que el nanosatélite cuenta con un subsistema de estabilización en tres ejes.

Durante el desarrollo de este trabajo se analizaron algunos sistemas comerciales de comunicaciones en banda S y se escogió uno de ellos tomando en cuenta el uso de componentes COTS (Commercial Off-The-Shelf), posteriormente se realizaron las pruebas y adaptaciones necesarias para optimizar la configuración del sistema seleccionado y garantizar el correcto acoplamiento con los subsistemas satelitales con los que interactúa, también se realizaron pruebas utilizando un software básico de operación para descarga de imágenes y su visualización en una computadora personal.



## **Abstract**

This thesis is concerned with the selection, performance testing and adaptations of hardware and software of a communication system in S band to work as a means of downloading satellite images of a university nanosatellite, which is built with the aim of training new generations of students in aerospace and may have within reach an nanosatellite that meets the CubeSat standard.

In addition, the university nanosatellite has communications in VHF (Very High Frequency) and UHF (Ultra High Frequency) Amateur radio, however, S-band is possible to have more bandwidth and therefore a higher download speed fundamental for the transmission of large amounts of data. S-band communications are directional, so the nanosatellite has a subsystem three-axis stabilization.

During the development of this work some commercial systems S-band communications were analyzed and chose one of them taking into account the use of COTS (Commercial Off-The-Shelf), then the tests were conducted and adjustments necessary to optimize selected system configuration and ensure proper engagement with the satellite subsystems with which it interacts, tests were also conducted using a basic operating software for downloading and viewing images on a personal computer.

## Objetivos de la tesis

A través de esta investigación se busca seleccionar un sistema COTS de comunicaciones en banda S, realizar pruebas de transmisión, configurar y adaptar dicho sistema en banda S para que pueda operar como sistema de bajada de imágenes satelitales, para realizar esto, primeramente procederemos a investigar que sistemas en Banda S hay en el mercado, y estudiaremos sus características tanto de hardware, software, mecánicas, precio de mercado y se investigará la experiencia de vuelo de CubeSats con dicho sistema de comunicación.

Los objetivos específicos de la tesis son:

- Analizar y Seleccionar un sistemas en banda S
- Realizar pruebas de transmisión utilizando el sistema en Banda S seleccionado.
- Adaptar el Hardware del sistema en Banda S para conectarlo con los demás subsistemas.
- Adaptar Software de operación

## Organización de la tesis

El contenido de la presente tesis está dividido en siete capítulos a lo largo de los cuales se describe el proceso de selección del subsistema de comunicaciones en banda S, su configuración optima, adaptaciones al hardware y desarrollo de software de operación básico.

El **capítulo uno**, habla sobre el marco de referencia en el cual se desarrolla esta tesis, el desarrollo del estándar CubeSat a partir del año 1999, la puesta en órbita de los primeros CubeSats que implementaron un subsistema de comunicaciones en banda S en el año 2006 y una breve descripción del nanosatélite universitario.

El **capítulo dos** describe a grandes rasgos el canal de comunicaciones a través del cual se llevan a cabo las comunicaciones de un nanosatélite ubicado en órbita LEO. Este capítulo se considera como punto de partida para conocer los requerimientos técnicos con que debe de cumplir el sistema de comunicaciones en banda S.

En el **capítulo tres**, se analiza algunos sistemas comerciales de comunicaciones que funcionan en banda S, con la finalidad de seleccionar uno de ellos para adaptarlo al nanosatélite universitario, posteriormente se describe el hardware y la manera de configurar dicho sistema de comunicaciones. A lo largo de este trabajo

se hará referencia a dicho sistema de comunicaciones como subsistema de comunicaciones en banda S.

El **capítulo cuatro**, describe los subsistemas con los que se conecta directamente el subsistema de comunicaciones en banda S, como son la computadora de vuelo, el subsistema de potencia, la antena Rómbica de cruz, la antena parabólica; también se describe la carga útil, que no interactúa directamente con el subsistema de comunicaciones en banda S, pero es fundamental para diseñar el software de operación.

En el **capítulo cinco**, se describe los diferentes componentes hardware que conforman una estación terrena, necesarios para comunicarnos con un nanosatélite con las características del nanosatélite universitario.

El **capítulo seis**, presenta la configuración óptima y las pruebas de comunicación realizadas, con lo cual validamos el correcto funcionamiento del subsistema de comunicaciones en banda S y el subsistema de antenas. Posteriormente se procedió a la adaptación del hardware para lograr la compatibilidad eléctrica con los diferentes subsistemas satelitales con los que se conecta como son computadora de vuelo, subsistema de potencia y antena Rómbica de cruz.

El **capítulo siete**, explica el funcionamiento del software básico de operación, para el envío de imágenes por banda S, lo cual permite que las imágenes sean recibidas y visualizadas en una computadora personal, dicho software fue diseñado y programado en colaboración por un equipo de investigadores del IINGEN-UNAM que participan en el proyecto del nanosatélite universitario.

Finalmente, aparecen las conclusiones de la presente tesis.

## **Índice de Tablas**

Tabla 1.1 Algunos CubeSats diseñados para operar en Banda S que fueron puestos en órbita LEO a partir del año 2006 .....	4
Tabla 1.2 Bandas de frecuencia de la UIT.....	6
Tabla 2.1 Parámetros a considerar para realizar el cálculo de enlace en banda S.....	10
Tabla 3.1 Especificaciones técnicas del radio Banda S de la empresa ISIS.....	17
Tabla 3.2 Especificaciones técnicas del radio banda S de la compañía ClydeSpace.....	18
Tabla 3.3 Especificaciones técnicas del modem n2420 de la empresa Microhard.....	19
Tabla 3.4 Tabla comparativa de los sistemas de comunicación en banda S analizados en el proceso de selección del subsistema de comunicaciones para el nanosatélite universitario....	20
Tabla 4.1 Breve descripción de los pines del conector AVX-Kyocera 5046 que reciben o transmiten algún tipo de señal.....	31
Tabla 4.2 Pine del puerto de datos RS232 de la tarjeta de desarrollo.....	33
Tabla 4.3 Pines del puerto de datos RS485/422 de la tarjeta de desarrollo.....	33
Tabla 4.4 Algunas de las especificaciones técnicas más importantes del microcontrolador TMS570LS1227 de Texas Instruments.....	34
Tabla 4.5 Algunas de las especificaciones técnicas más importantes del microcontrolador MSP430F1612 de Texas Instruments.....	36
Tabla 5.1 Parámetros AT configurados en el modem receptor o modem Maestro n2420.....	42
Tabla 5.2 Características principales del rotor YAESU G-5500.....	44
Tabla 6.1 Hardware y equipo utilizado para pruebas.....	48
Tabla 6.2 Configuración de los registros del modem maestro y esclavo.....	50
Tabla 6.3 Datos del enlace realizado entre Pico tres padres y Base Aérea Santa Lucía.....	54
Tabla 6.4 Portadoras detectadas por el analizador de espectros.....	58
Tabla 7.1 Formato de los Bloques Xmodem .....	65
Tabla 7.2 Formato de los paquetes Kermit .....	67
Tabla 7.3 Tipos de paquetes de Kermit .....	68

## Índice de Figuras

Figura 1.1 a) CubeSat CP1, b) P-POD.....	2
Figura 2.1 a) Posición orbital nanosatélite Universitario, b) Triángulo escaleno, utilizado para calcular la distancia del satélite a la estación terrena.....	11
Figura 3.1 Elementos de la comunicación.....	15
Figura 3.2 Elementos de comunicaciones que participan en el enlace satelital Banda S.....	15
Figura 3.3 Radio Banda S de ISIS, modelo ISIS TXS.....	16
Figura 3.4 Radio Banda S de ClydeSpace, modelo CS-CPUT-STX-01.....	17
Figura 3.5 Radio Banda S de Microhard, modelo n2420 montado en tarjeta de desarrollo nano motherboard.....	19
Figura 3.6 Diagrama a bloques del modem n2420 de la empresa Microhard.....	21
Figura 3.7 Diagrama a bloques de la UART del n2420.....	22
Figura 3.8 Amplificador de bajo ruido (LNA) para microondas, utilizado en modem n2420.....	23
Figura 3.9 Mezclador.....	23
Figura 3.10 Etapa del transmisor.....	24
Figura 4.1 Modem comercial n2420 de Microhard Systems Inc a) Vista frontal, b) Vista posterior donde podemos observar el conector AVX-Kyocera 5046 de 60 pines y el conector MMCX.....	29
Figura 4.2 Pines del conector AVX-Kyocera 5046 según son utilizados por el modem n2420	30
Figura 4.3 Nano Motherboard , a) Vista frontal, b) Vista posterior.....	32
Figura 4.4. Antena de microcinta del nano satélite universitario a) Vista frontal, b) Vista posterior, donde podemos observar el conector sma de dicha antena.....	37
Figura 4.5 Ganancia medida y simulada en el software CST de la antena rómbica de cruz.....	37
Figura 4.6 Patrón de radiación de la antena de banda S.....	38
Figura 4.7 Subsistema de potencia del nanosatélite universitario.....	39
Figura 4.8 Cámara de percepción remota.....	39
Figura 5.1 Comunicación del nanosatélite-estación terrena.....	41
Figura 5.2 Antena parabólica para banda S utilizada realizar pruebas.....	42
Figura 5.3 Ángulos de movimiento de antena parabólica para banda S.....	43
Figura 5.4. Rotor y controlador YAESU G-5500.....	44
Figura 6.1 Hyperterminal, a) Configuración de puerto serie, b) Protocolos de transferencia de archivos implementados.....	46

Figura 6.2 Realterm, software para visualizar paquetes de datos en diferentes formatos a) formato en el que se visualizarán los datos, b) configuración del puerto.....	47
Figura 6.3 Tarjeta emuladora de computadora de vuelo.....	49
Figura 6.4 Dummy que emula el funcionamiento de la cámara.....	49
Figura 6.5 a) Antena Rómbica de cruz montada en torre de 20 metros de altura utilizada para pruebas de comunicación entre dos módems n2420 ubicados a 1 km de distancia b) Enlace realizado entre los edificios de ESIME-Zacatenco y ESIME-Ticomán, distancia de enlace de 1.04 km en línea de vista.....	50
Figura 6.6 Enlace realizado entre el edificio de ESIME-Zacatenco y la base área de transmisiones, distancia de enlace de 10.6 km en línea de vista.....	51
Figura 6.7 Prueba de enlace en una distancia de 22 Km entre cerro pico tres padres y base aérea Santa Lucia.....	52
Figura 6.8 a) Antena parabólica con el radio receptor de banda S conectado b) Antena rómbica de cruz con el radio transmisor de banda S conectado.....	53
Figura 6.9 Analizador de espectros conectado a la antena parabólica ubicada en Tecamac, con la finalidad de medir la potencia de recepción.....	54
Figura 6.10 Potencia recibida en base aérea Santa Lucia, con antena parabólica.....	57
Figura 6.11 Potencia recibida en el cerro “pico tres padres”, con antena rómbica de cruz.....	59
Figura 6.12 Modificaciones a la nano motherboard.....	61
Figura 6.13 Pruebas de envío de imagen con dummy emulando las funciones de la cámara y tarjeta MSP430 emulando a la computadora de vuelo.....	61
Figura 6.14 Conexión de equipo para pruebas de transmisión de imagen a) Equipo y software para recepción de imagen b) Equipo para transmitir imagen.....	62
Figura 6.15 Conexión de subsistemas para pruebas de transmisión de imágenes.....	62
Figura 6.16 Pruebas Computadora de Vuelo - Banda S.....	63
Figura 7.1. Envío recepción de archivo utilizando Xmodem.....	66
Figura 7.2. Envío y recepción de archivo utilizando Kermit.....	69
Figura 7.3. Envío de paquetes Kermit por Banda S.....	71
Figura A.1 Arco de trayectoria del nanosatélite en el cual es visible desde la estación terrena.	75
Figura A.2 a) Modulación FSK, b) Modulación GFSK.....	76
Figura A.3 Emisor de espectro ensanchado por salto de frecuencia.....	77
Figura A.4 Receptor de espectro ensanchado por salto de frecuencia.....	78

## **Lista de acrónimos**

AFSK	Audio Frequency Shift Keying
ARQ	Automatic Repeat reQuest
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
COTS	Commercial Of The Shelf
CRC	Cyclic Redundancy Check
DCE	Data Communications Equipment
DTE	Data Terminal Equipment
FEC	Forward Error Correction
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO	International Organization for Standardization
LEO	Low Earth Orbit
LNA	Low Noise Amplifier
MSK	Minimum Shift Keying
OEM	Original Equipment Manufacturer
OQPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
OSI	Open System Interconnection
PCB	Printed Circuit Board
QFC	Quad Flat Package
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RISC	Reduced Instruction Set Computer
SOH	Start Of Header
TDMA	Time Division Multiple Access
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
UIT	Union Internacional de Comunicaciones

# CAPÍTULO

# 1

## *Introducción*

### **1.1 Introducción**

Desde el año 1999 a la fecha han sido puestos en órbita LEO (Low Earth Orbit), la cual está ubicada entre 200 y 2000 Km de la superficie terrestre, una gran cantidad de satélites pequeños que cumplen con el estándar CubeSat, los primeros CubeSats incluían subsistemas de comunicaciones en VHF y/o UHF, posteriormente (alrededor del año 2006) se empezaron a poner en órbita CubeSats que incluían un subsistema de comunicaciones en Banda S, motivados principalmente por ser esta una banda ISM (Industrial, Scientific and Medical), y por que permite la transmisión de datos a mayor velocidad, al disponer de un ancho de banda mayor que en VHF o UHF.

En el presente capítulo se describe a grandes rasgos el estándar CubeSat, las bandas de frecuencia que comúnmente se utilizan en los CubeSats, el nanosatélite universitario y el tipo de componentes utilizados en su construcción.

### **1.2 Estándar CubeSat**

El estándar CubeSat es una propuesta realizada por los profesores Jordi Puig-Suari y Bob Twiggs de la “California Polytechnic State University” y la “Stanford University” respectivamente, en el año 1999, dada la dificultad que existía para las universidades de introducir y capacitar a sus estudiantes en el campo satelital, lo cual implicaba elevados costos de fabricación y puesta en órbita.

Este estándar proporciona especificaciones de tamaño y peso para nano satélites, la unidad básica de un CubeSat es un cubo que mide 10 cm por arista y tiene un



peso no mayor a 1 kilogramo el cual se dice que es un CubeSat 1U, también se fabrican CubeSats 2U de 10x10x20cm y CubeSats 3U de 10x10x30cm. Los primeros CubeSats fueron puestos en órbita en junio de 2003, actualmente varias universidades, instituciones de gobierno y empresas privadas aprovechan los beneficios de este estándar para desarrollar y/o construir picosatélites o nanosatélites con el estándar CubeSat; existen varias empresas que venden hardware y software e incluso kits completos para construir nanosatélites que cumplen con el estándar CubeSat.

La figura 1.1-a muestra una imagen del CubeSat CP1, primer CubeSat lanzado por la “California Polytechnic State University” en julio del 2006, por desgracia, no pudo ser puesto en órbita debido a falla del cohete con que fue lanzado [1], en abril del 2007 lograron poner en órbita el CP3 el cual utilizaba una banda de comunicaciones en UHF [2].

La figura 1.1-b muestra un P-POD que es un contenedor estandarizado para los CubeSats, el mostrado en la figura puede contener ya sea tres CubeSats 1U, un CubeSat 1U junto con uno 2U o bien un CubeSat 3U. El P-POD funciona como interfaz entre el vehículo de lanzamiento y los CubeSats, minimizando la interacción entre estos.



Figura 1.1 a) CubeSat CP1[1], b) P-POD[3].

### 1.3 Componentes utilizados en la construcción de Cubesats

Se denomina componentes COTS tanto a los productos hardware o software que son diseñados por una empresa para uso general, algunas de las ventajas que tiene un producto COTS sobre un producto personalizado son: [4]

- Costo reducido

- Fácilmente disponibles
- Reducción del riesgo de fallas
- Mantenimiento y actualizaciones por parte del fabricante o proveedor
- Ciclo de desarrollo corto
- Más flexible, escalable y configurable

Como se puede observar, son muchas las ventajas de utilizar componentes COTS sobre los componentes personalizados, que si bien tienen la ventaja de ser diseñados a la medida, existe una mayor probabilidad de que fallen.

La electrónica satelital es muy cara debido entre otras cosas a que debe permanecer en un ambiente hostil durante toda la vida útil del satélite que es de varios años y es diseñada y validada para ello. Muchos CubeSats han sido construidos utilizando componentes COST robustos, de grado automotriz por ejemplo, que tal vez no dure muchos años sometido a las condiciones extremas que se dan en el espacio, pero si lo suficiente para alcanzar los objetivos de la misión.

Al ser el nanosatélite universitario un proyecto académico de bajo presupuesto, varios de sus subsistemas estarán conformados por componentes COTS.

## 1.4 Estado del arte

Cuando surgió el estándar CubeSat algunas universidades empezaron a interesarse en la construcción de satélites pequeños con fines educativos, para implementar un sistema de comunicaciones en un CubeSat que opere en órbita LEO, hay que tomar en cuenta:

- El tamaño pequeño de los CubeSats
- La necesidad de comunicaciones omnidireccionales, ya que los primeros CubeSats no contaban con mecanismos de estabilización.
- La utilización de componentes de bajo costo, dado el bajo presupuesto con que se cuenta para este tipo de proyectos

Las bandas de frecuencia que con mayor facilidad se pueden adaptar a los requerimientos son VHF y UHF, más específicamente las bandas designadas para los radioaficionados, las cuales pueden ser utilizadas cumpliendo con la reglamentación correspondiente no teniendo que pagar altos costos por la utilización del espectro radioeléctrico. La construcción de las antenas también se facilita en las bandas VHF y UHF, ya que en el segmento espacial la antena es un dipolo frecuentemente construido con tramos de flexómetro que se despliegan cuando el CubeSat es puesto en órbita y proporcionan comunicaciones

omnidireccionales. En el segmento terrestre se utilizan antenas tipo Yagi las cuales son fáciles de construir.

Por todo lo mencionado, las bandas de radioaficionados en VHF y UHF son ampliamente utilizadas, sin embargo, dada la gran cantidad de datos que requieren transmitir algunas aplicaciones como puede ser el caso de una cámara fotográfica o incluso de video ha sido necesario buscar otras alternativas, posteriormente algunos CubeSat empezaron a incluir comunicaciones en Banda S, la cual tiene las ventajas de ser una Banda ISM y proporcionar un mayor ancho de banda, lo que agiliza la transmisión de datos.

*Tabla 1.1 Algunos CubeSats diseñados para operar en Banda S que fueron puestos en órbita LEO a partir del año 2006 [5]*

Satélite	Fecha de lanzamiento	Modelo de radio	Frecuencia	Tasa de Baudios/Modulación
GeneSat-1	2006 (Dic)	Microhard MHX-2400 Stensat (beacon) 7	2.4 GHz 437.067 MHz	1200 baud AFSK
MAST10	2007 (Abr)	Microhard MHX-2400	2.4 GHz	15 kbps
CanX-2	2008 (Abr)	Custom S-Band	2.2 GHz	16-256kbps BPSK
PharmaSat	2009 (May)	Microhard MHX-2400 Stensat (beacon) 7	2.4 GHz 437.465 MHz	10 kbps 1200 baud AFSK
O/OREOS	2010 (Nov)	Microhard MHX-2400 Stensat (beacon)	2.4 GHz 437.305 MHz	Variable 1200 baud AFSK
NanoSail-D2	2010 (Nov)	Microhard MHX-2400 Stensat (beacon)	2.4 GHz 437.270 MHz	Variable 1200 baud AFSK
Goliat	2012 (Feb)	Alinco DJ-C7 Microhard MHX-2420	437.485 MHz 2.4 GHz	1200 baud AFSK/20 WPM Variable
CINEMA	2012 (Sep)	Emhiser	2200 MHz	1 Mbps FSK
Dove-2	2013 (Abr)	Custom UHF MHX-2420	401.3 MHz 2.4 GHz	2.4 kbps FSK variable
Ho'oponopono-2	2013 (Nov)	Microhard MHX-2420 AstroDev Ne-1 (beacon)	2.4 GHz 437.220 MHz	57.6 kbps
NPS-SCAT	2013 (Nov)	Microhard MHX-2400 CC1000 (beacon) 2	2.4 GHz 437.525 MHz	1200 baud FSK
SENSE (2)	2013 (Nov)	Innoflight SCR-100	2.2 GHz	No especificado
KHUSAT (2)	2013 (Nov)	Emhiser	2.2 GHz	1 Mbps FSK
Delfi-n3xt	2013 (Nov)	ISIS TRXUV ISIS Custom	145.900 MHz 2.405 GHz	9600 baud BPSK 20-500 kbps MSK
ArduSat-2	2014 (Feb)	AstroDev Li-1 AstroDevBeryllium	400 MHz 2.4 GHz	No especificado
ALL-STAR	2014 (Abr)	Custom SDR	2401.7 MHz	250 kbps BPSK
AntelSat5	2014 (Jun)	Custom (beacon) Custom (downlink) Custom (downlink)	437.280 MHz 437.575 MHz 2403 MHz	1200 baud FSK/AFSK 500 kbps GFSK
DTUSat-2	2014 (Jun)	Custom	2.401 GHz	38.4 kbps MSK
UKube-1	2014 (Jul)	ISIS TRXUV FUNcube-2 CS-CPUT-STX-01	145.840 MHz 145.915 MHz 2.401 GHz	1200 baud BPSK 1200 baud BPSK 2 Mbps QPSK

En la tabla 1.1, se muestran algunos nanosatélites CubeSat que funcionan con un sistema de comunicación en banda S para Downlink, los cuales empezaron a ponerse en órbita en 2006, la tabla 1.1, es un resumen de la base de datos de [5], donde podemos ver el tipo de sistema de comunicaciones utilizado, así como su esquema de modulación.

El sistema de comunicaciones en banda S es altamente direccional, por lo que es necesario complementarlo con comunicaciones en VHF o UHF que son omnidireccionales, reduciendo el riesgo de que se puedan perder de vista.

## 1.5 Nanosatélite Universitario

El IINGEN (UNAM) en colaboración con el CICESE y el IPN realiza el diseño y construcción de un nanosatélite experimental con fines educativos con la finalidad de que nuevas generaciones de estudiantes se interesen en el área de diseño de instrumentación satelital. Dicho nanosatélite se ajusta al estándar CubeSat, más específicamente, será un CubeSat 3U, la carga útil es una cámara fotográfica, la cual proporcionará imágenes con un tamaño máximo de 362KB, motivo por el cual se pensó en Banda S con el fin de agilizar el envío de datos. A lo largo de esta tesis nos referiremos al nanosatélite experimental como nanosatélite universitario.

## 1.6 Bandas de frecuencia utilizadas por el nanosatélite universitario

La UIT (Unión Internacional de Comunicaciones) clasifica el espectro electromagnético en bandas de frecuencia, según se muestra en la tabla 1.2, en el campo "Symbols" aparece la nomenclatura recomendada para referirnos a cada una de las bandas de frecuencia. En las áreas satelital y de radares se le llama Banda S a la banda de frecuencias comprendida entre 2-4 GHz. El subsistema de comunicaciones que se busca implementar en el nanosatélite universitario trabajará alrededor de la frecuencia de 2.4 GHz, de ahí que nos refiramos a él como sistema de comunicaciones en banda S. Como ya se ha comentado, el nanosatélite contará con comunicaciones en UHF y VHF, más específicamente en las frecuencias 435MHz y 132MHz.

Puesto que  $\lambda = v/f$ , las longitudes de onda de VHF están entre 1 y 10 metros, para UHF están entre 10 cm y 1 metro, esto nos da una idea del tamaño de las antenas para VHF y UHF, las cuales son más grandes que las antenas para Banda S.

Tabla 1.2 Bandas de frecuencia de la UIT [6]

Número de la banda	Símbolos (en inglés)	Gama de frecuencias (excluido el límite inferior, pero incluido el superior)	Subdivisión métrica correspondiente	Abreviaturas métricas para las bandas
3	ULF	300-3 000 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	300-3 000 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	300-3 000 MHz	Ondas decimétricas	B.dm
10	SHF	3-30 GHz	Ondas centimétricas	B.cm
11	EHF	30-300 GHz	Ondas milimétricas	B.mm
12		300-3 000 GHz	Ondas decimilimétricas	B.dmm
13		3-30 THz	Ondas centimilimétricas	B.cmm
14		30-300 THz	Ondas micrométricas	B.µm
15		300-3 000 THz	Ondas decimicrométricas	B.dµm

# CAPÍTULO

# 2

## *Comunicaciones Satelitales en órbita LEO*

### **2.1 Introducción**

Analizaremos las características del canal de comunicaciones para el cual se diseñará el nanosatélite universitario, supondremos que el nanosatélite será colocado en una órbita inclinada con respecto al ecuador, a 600 km de la superficie terrestre. Mientras más cercana a la tierra esté la órbita, menor será el tiempo que tarda un CubeSat en dar una vuelta alrededor de la esfera terrestre y menor será el tiempo que es visible desde una estación terrena.

El efecto Doppler es considerable, dada la gran velocidad tangencial con que se mueve un CubeSat en órbita LEO, el receptor percibe que el transmisor se acerca a gran velocidad cuando el CubeSat aparece en el horizonte y que se aleja a gran velocidad cuando se pierde en el horizonte, por lo que se presenta una desviación con respecto a la frecuencia central de la portadora, que debe ser corregida.

Por otro lado, se presentan diferentes fenómenos atmosféricos, que afectan en menor o mayor grado las comunicaciones satelitales.

### **2.2 Canal de comunicaciones**

Las comunicaciones satelitales se enfrentan a diversos problemas de transmisión que son intrínsecos a este medio de comunicación:

- Las largas distancias que recorren las ondas electromagnéticas generan retardos, los cuales deben ser tomados en cuenta de acuerdo a la aplicación para la que se utilizará dicho enlace.

- El movimiento respecto a la tierra de los satélites que no están en una órbita geoestacionaria ocasiona que se presente el efecto Doppler, el cual debe ser tomado en cuenta y corregido al diseñar equipo de comunicaciones.
- Las diferentes capas atmosféricas afectan a las comunicaciones en menor o mayor grado dependiendo de la banda de frecuencia utilizada.

En el caso de la órbita LEO y particularmente en el caso del nanosatélite universitario el retardo es despreciable, ya que los cálculos se realizarán asumiendo que el nanosatélite estará en una órbita a 600 km sobre la superficie terrestre, según estos cálculos la mínima distancia que recorrerá la señal será de 600 km (cuando el satélite está más cerca de la estación terrena) y la máxima de 815.52 km cuando el nanosatélite se encuentra a un ángulo de  $45^\circ$  sobre la horizontal visto desde la estación terrena, por lo que la señal tendrá un retardo aproximado de 0.03 s.

## 2.3 Efecto Doppler

El efecto Doppler se puede describir como el cambio en frecuencia de una onda debido al movimiento de la fuente relativa al observador. En la comunicación vía satélite, cuando un satélite se aproxima a una estación terrena hay un desplazamiento Doppler positivo, mientras que después de que pase un satélite sobre la estación terrena hay un cambio Doppler negativo. Esto provoca un cambio en la frecuencia llamado como el efecto Doppler. La ecuación del efecto Doppler para las ondas electromagnéticas es:

$$F_s = F_a \left( \frac{v}{c} \right) \quad (2.1)$$

Donde  $F_s$  es el desplazamiento Doppler dado en Hz,  $F_a$  es la frecuencia de transmisión dada en Hz,  $v$  es la velocidad relativa entre el transmisor y el receptor se mide en km/s y  $c$  es la velocidad de la luz en km/s. Esta ecuación indica que el máximo efecto Doppler para LEO utilizando un transceptor de 2.4 GHz no excederá de  $\pm 70$ kHz (para una velocidad relativa máxima del transmisor de 8.75 km/s).

## 2.4 Presupuesto de potencia

Para dimensionar los diferentes parámetros que intervienen en un enlace, como son potencia de transmisión, ganancias de antenas, etc. y poder garantizar que la comunicación se lleve a cabo, es necesario realizar un presupuesto de potencia, el cual consiste en el cálculo de las ganancias y pérdidas desde el transmisor hasta el receptor, los elementos que consideraremos para realizar el presupuesto de potencia son:

- Elementos en el transmisor
- Elementos de propagación
- Elementos en el receptor

En el lado del transmisor tenemos la potencia de transmisión, la ganancia de la antena, la atenuación en el cable y en los conectores; cuando analizamos un enlace satelital tenemos que considerar que la energía de las baterías es limitada y se tiene que administrar adecuadamente, por otro lado aun cuando los cables y los conectores sean de excelente calidad, introducen una atenuación que debe ser considerada.

Para la propagación tomamos en cuenta las pérdidas en espacio libre las cuales aparecen inevitablemente al disminuir la densidad de potencia de la señal a medida que nos alejamos del transmisor, lo cual queda expresado por la ecuación 2.2 para perdidas en espacio libre:

$$L_{FS} = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2.2)$$

Donde

d es la distancia del enlace

$\lambda$  es la longitud de onda

Expresado en logaritmos [7]

$$L_{FS} = 20 \log \left( 4\pi \frac{\text{distancia}}{\text{longitud de onda}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.3)$$

Para un nanosatélite en órbita LEO, el valor de la distancia d cambia muy rápidamente siendo máximo cuando el nanosatélite aparece en el horizonte y mínimo cuando está justo arriba de la estación terrena (suponiendo que la órbita pasa justo arriba de la estación terrena). En este análisis se ignora cualquier fenómeno atmosférico que pueda causar atenuación los cuales tienen que ser



analizados utilizando un modelo de atenuación, el principal fenómeno atmosférico al que puede enfrentarse el enlace es la atenuación por lluvia la cual puede ser ignorada ya que esta crece a medida que crece la frecuencia de operación y la longitud de onda se acerca al tamaño de las gotas de agua.

Otro aspecto que hay que considerar es que para ángulos de elevación pequeños de la antena de estación terrena la primera zona de Fresnel es obstruida por diversos obstáculos que existen en la ciudad de México (edificios, etc), esto unido a que la distancia a la que se encontraría el nanosatélite es mucho más grande que cuando se encuentra sobre la estación terrena.

De manera similar, a lo que ocurre en el lado del transmisor, en el receptor se considera la ganancia de la antena, la atenuación en el cable y en los conectores.

## 2.5 Análisis de potencia recibida, nanosatélite en órbita a 600 km

En esta sección se realiza el cálculo de enlace para la banda S, se asume que el satélite va a volar a una altura de 600Km por encima de la superficie terrestre, la potencia máxima de transmisión del transmisor de banda S es de 1W (30dBm) la ganancia de la antena transmisora tipo “Rómbica de cruz”, ubicada en el satélite es de 4 dBi, la ganancia de la antena receptora ubicada en la estación terrena es de 30dBi. Algunos parámetros a considerar se encuentran descritos en la tabla 2.1

Tabla 2.1 Parámetros a considerar para realizar el cálculo de enlace en banda S

DATOS DEL ENLACE	
Radio de la tierra	6378.14 Km
Altura mínima de vuelo	600 Km
Longitud de onda	0.125 m
Ángulos de avistamiento	Entre 45 y 135°
Sensibilidad del receptor	-107dBm

La potencia recibida,  $P_{RX}$  [dBm] se puede calcular con la ecuación 2.4 [8]

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - L_{FS} - L_M + G_{RX} - L_{RX} \quad (2.4)$$

Donde:

$P_{TX}$  es la potencia de salida transmitida [dBm] = 30 dBm o 1 Watt (banda S)

$G_{TX}$  es la ganancia de la antena en el transmisor [dBi] = 4 dBi

$L_{TX}$  es la pérdida entre el transmisor y la antena [dB] = 1 dB

$L_{FS}$  es la pérdida en el espacio libre [dB] (Calculado por la ecuación 2.3)

$L_M$  son las pérdidas diversas por interferencia atmosférica (ionosfera, humedad...) = 0 dB (suponiendo un caso ideal)

$G_{RX}$  es la ganancia de la antena en el receptor (dBi) = 30 dBi (antena parabólica de banda S)

$L_{RX}$  es la pérdida en el receptor = 0 dB (Banda S)

Asumiendo que la altura del nanosatélite es de 600 km. Se especifica que la distancia más alejada del satélite a la estación terrena a la que se podrán hacer descargas,  $d$ , estará localizada a  $45^\circ$  de elevación, esta distancia se puede calcular de la manera siguiente basándose en la figura 2.1

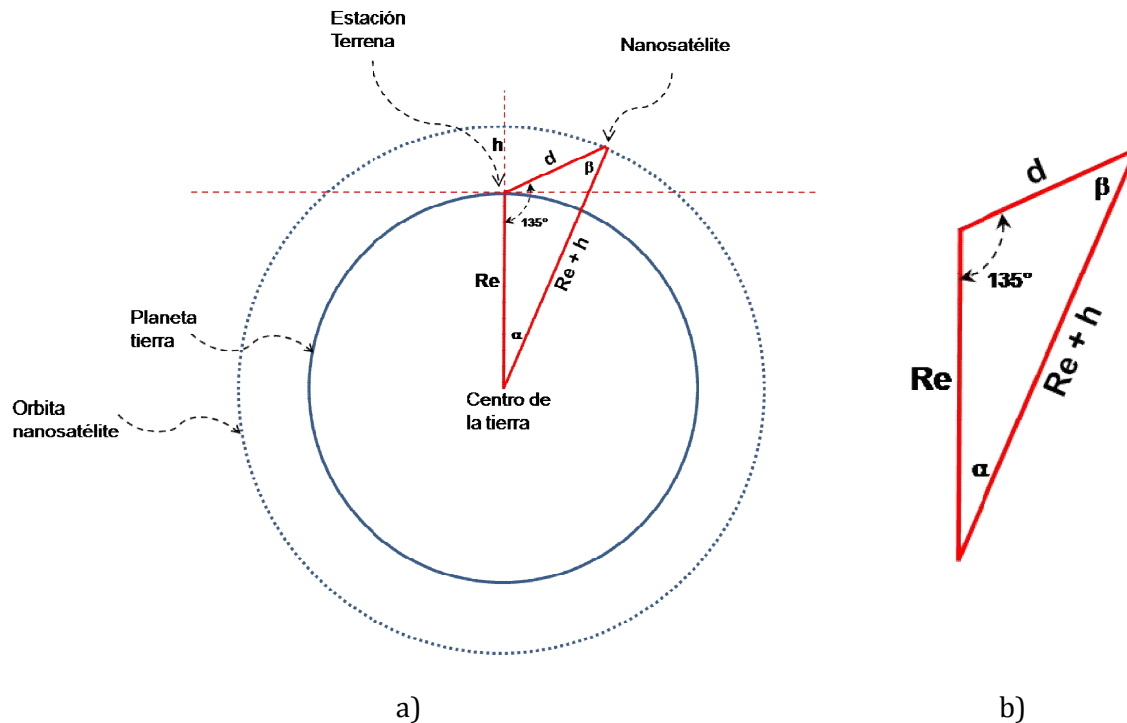


Figura 2.1 a) Posición orbital nanosatélite Universitario, b) Triángulo escaleno, utilizado para calcular la distancia del satélite a la estación terrena

Donde la altura de la órbita  $h=600\text{km}$ , el radio de la tierra  $R_e=6,378\text{ km}$ , usando la ley de senos se obtiene el valor del ángulo  $\alpha$ .

$$\frac{R_e + h}{\sin 135^\circ} = \frac{R_e}{\sin \beta}$$

$$\frac{6978\text{ km}}{\sin 135^\circ} = \frac{6378\text{ km}}{\sin \beta}$$

$$\beta = 40.26^\circ$$

$$\therefore \alpha = 180^\circ - 135^\circ - 40.26^\circ = 4.74^\circ$$

Aplicamos nuevamente la ley de senos para calcular  $d$  a partir del valor encontrado de  $\alpha$ .

$$\frac{d}{\sin \alpha} = \frac{R_e}{\sin \beta}$$

$$\frac{d}{\sin 4.74^\circ} = \frac{6378\text{ km}}{\sin 40.26^\circ}$$

$$d = 815.52\text{ km}$$

Se encuentra una distancia  $d = 815.52\text{ km}$  (el peor de los escenarios de descarga de datos será cuando el satélite esté a  $45^\circ$  en el horizonte). De la ecuación 2.3 el valor de  $L_{FS}$  en el peor de los escenarios se calcula y se obtiene:

$$L_{FS\ 45^\circ} = 20 \log \left[ 4\pi \frac{815520}{0.125} \right] = 158.2\text{ dB}$$

En el peor de los escenarios el valor de  $P_{RX}$  encontrado es:

$$P_{RX\ 45^\circ} = 30 + 4 - 1 - 158.2 + 30 - 1 = -96.2\text{ dBm}$$

El valor calculado de  $P_{RX\ 45^\circ}$  está  $10.8\text{ dB}$  (banda S) por arriba del límite de la sensibilidad del transceptor n2420 ( $-107\text{ dBm FSK}$ ), indicando que aun estando a una elevación de  $45^\circ$  en el horizonte, el avistamiento del satélite es posible.

## 2.6 Codificación de canal

En cualquier sistema de comunicación, aumentar la potencia de transmisión hace que el BER (Bit Error Rate) sea más pequeño, en el caso de un nanosatélite no es

una opción viable, puesto que cuenta con energía limitada y es necesario administrarla eficientemente. Hay que tomar en cuenta que la señal transmitida desde el nanosatélite tiene que enfrentarse a muchas adversidades además de la atenuación mencionada anteriormente, también puede presentarse ruido en ráfaga, el cual ocasiona que se pierdan algunos bits adyacentes o incluso la trama completa. Una manera de mejorar el canal es utilizar “codificación de canal” para la detección y/o corrección de errores, lo cual mejora el BER, haciendo el canal más fiable. Existen dos métodos para corregir la información recibida:

- Por una parte, la técnica ARQ (Automatic Repeat reQuest) es utilizada para corregir errores en los datos al solicitar el reenvío de la información, lo cual implica agregar los bits suficientes para detectar que existen errores en el paquete transmitido, sin embargo este enfoque puede no ser del todo apropiado en aplicaciones donde la distancia es muy grande y/o la tasa de errores es alta. Un ejemplo de los protocolos que se valen del reenvío de paquetes son los protocolos Stop-And-Wait, Go-Back-End y Selective Repit.
- Otro método para corregir errores es utilizando FEC (Forward Error Correction), lo cual consiste en agregar los bits de redundancia suficientes para poder detectar errores en los datos y poder corregirlos sin tener que solicitar el reenvío al transmisor. Este método es utilizado en canales donde la tasa de errores es muy alta y/o el retardo es muy grande.

# CAPÍTULO

# 3

## *Selección y descripción del subsistema de comunicaciones en banda S*

### **3.1 Introducción**

En este capítulo se analizan las características de algunos sistemas de comunicaciones que operan en banda S disponibles en el mercado, basándonos en los requerimientos técnicos, en la experiencia de vuelo de tales sistemas, así como en el costo, ya que el proyecto dispone de recursos limitados para poder llevarlo a cabo, una vez seleccionado y adquirido dicho modem, se procederá a realizar las pruebas de validación pertinentes, para garantizar que se adecúe a nuestras necesidades técnicas.

### **3.2 Elementos de la comunicación**

En la figura 3.1 se muestran los equipos que participan en un enlace de comunicaciones, el DTE (Data Terminal Equipment) y el DCE (Data Circuit-terminating Equipment) como una forma genérica de llamar a los diferentes equipos involucrados en la comunicación, a continuación se explicará brevemente a que se refieren estos términos, para posteriormente poder identificar los diferentes subsistemas que participarán en el envío y recepción de imágenes satelitales.

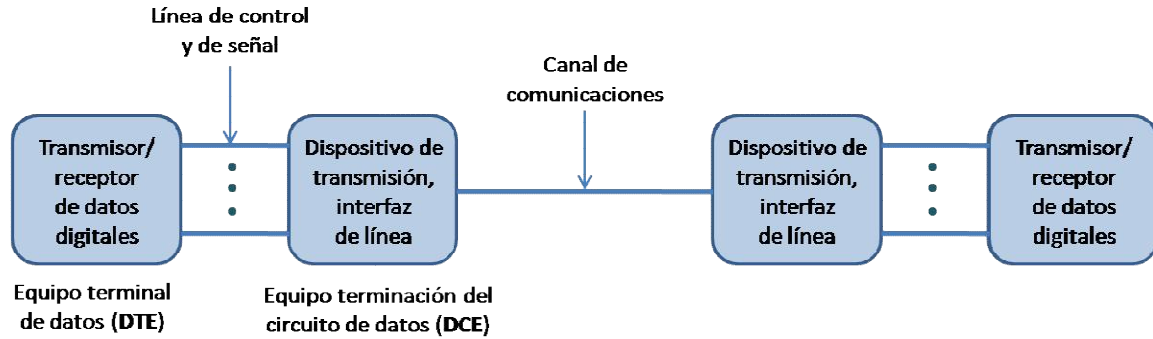


Figura 3.1 Elementos de la comunicación [9]

### 3.2.1 Equipo Terminal de Datos (DTE)

La denominación **Equipo terminal de datos** como se muestra en la figura 3.1 se refiere a cualquier equipo electrónico que funcione como origen o destino para datos digitales, de tal manera que el termino puede referirse a una computadora, o como en nuestro caso podemos considerar que la computadora de vuelo es nuestro DTE, ya que es el subsistema que recolecta los datos y hace uso de nuestro subsistema de transmisión en banda S (que como se verá en el siguiente apartado recibe la denominación de DCE), del lado de la estación terrena tenemos una computadora de escritorio la cual también es un DTE.

### 3.2.2 Equipo terminal del circuito de datos (DCE)

Un equipo terminal de circuito de datos es un sistema electrónico que recibe los datos digitales de un DTE y los acondiciona para su transmisión a través de una red, como se puede notar es un término general para referirnos a cualquier equipo no importando el medio de transmisión, un modem es un tipo de DCE que modula una señal portadora por medio de la información y la transmite por un medio analógico que puede ser cableado o inalámbrico. La figura 3.2 muestra los elementos que participarán en el enlace satelital en banda S.

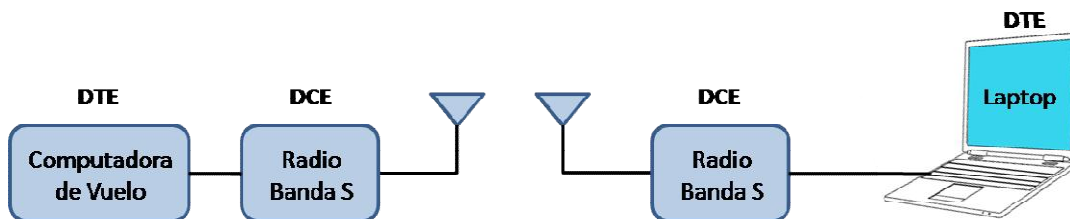


Figura 3.2 Elementos de comunicaciones que participan en el enlace satelital Banda S.

### 3.3 Transmisores, receptores y módems

La palabra modem es la contracción de las palabras modulador-demodulador, que son las dos funciones que realiza este equipo electrónico, recibe un señal digital y la convierte a analógica con la finalidad de que pueda viajar por el medio, ya sea físico o inalámbrico, en el extremo receptor el modem realiza la operación inversa, recibe una señal analógica y la convierte a digital, en nuestro caso el medio es inalámbrico.

Un modem cuenta con un transmisor y un receptor funcionando en modo half-duplex, o full-duplex, en el primer modo, el modem puede transmitir y recibir pero no al mismo tiempo, en el segundo modo puede transmitir y recibir al mismo tiempo, esto se logra al utilizar cables separados o frecuencias diferentes en el caso de módems inalámbricos.

### 3.4 Algunos Sistemas de comunicaciones en Banda S disponibles en el mercado

Se realizó una revisión de las ofertas de sistemas de comunicación en Banda S que ofrecen algunas de las principales empresas en el ramo de CubeSats

#### 3.4.1 Transmisor ISIS TXS

La empresa ISIS comercializa el transmisor en banda S mostrado en la figura 3.3, el cual tiene las características tanto mecánicas como eléctricas para ser montado en un CubeSat.

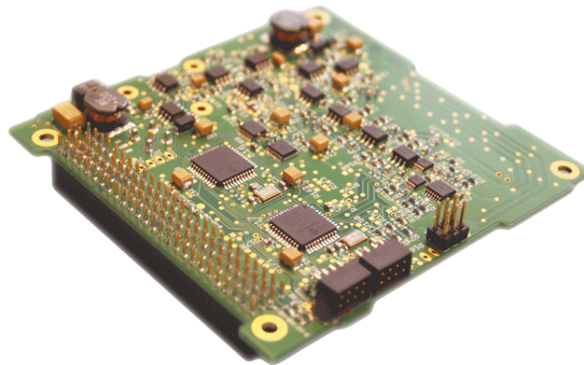


Figura 3.3 Radio Banda S de ISIS, modelo ISIS TXS [10]

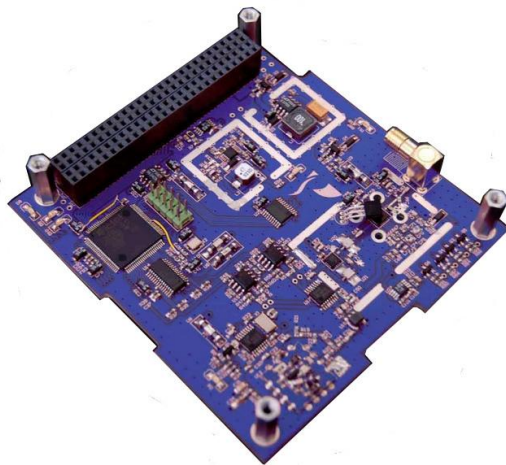
La hoja de especificaciones proporcionada por la empresa se muestra a continuación en la tabla 3.1 con las características técnicas y datos más importantes

*Tabla 3.1 Especificaciones técnicas del radio Banda S de la empresa ISIS [11]*

CARACTERISTICAS Y DATOS IMPORTANTES	
<b>Frecuencia de operación</b>	2100 MHz – 2500 MHz
<b>Potencia de salida máxima</b>	+28 dBm
<b>Data rate máximo</b>	100 Kbps
<b>Consumo de potencia</b>	≤ 4 W
<b>Modulación</b>	BPS o GMSK
<b>Fuente de alimentación</b>	5V y 3.3V
<b>Temperatura de operación</b>	-20 a +60 C
<b>Masa</b>	62 grams
<b>Dimensiones</b>	90 x 96 x 15 mm
<b>Interfaces</b>	I <sup>2</sup> C
<b>Salida RF</b>	SMA o MCX 50 ohm
<b>Experiencia de vuelo</b>	No especificado
<b>Precio</b>	€ 8,500.00

### 3.4.2 Transmisor Clyde Space, modelo CS-CPUT-STX-01

Por otro lado la compañía Clyde Space cuenta con un transmisor en banda S como el que se muestra en la figura 3.4, el cual ha sido diseñado para aplicaciones satelitales y puede ser montado en un CubeSat.



*Figura 3.4 Radio Banda S de Clyde Space, modelo CS-CPUT-STX-01 [12]*

En la tabla 3.2 se muestran resumidas las principales características técnicas que tiene el radio de banda S de la compañía Clyde Space.



*Tabla 3.2 Especificaciones técnicas del radio banda S de la compañía Clyde Space [13]*

<b>CARACTERISTICAS Y DATOS IMPORTANTES</b>	
<b>Frecuencia de operación</b>	2.4 - 2.45 GHz
<b>Potencia de salida máxima</b>	24 a 30 dBm
<b>Data rate máximo</b>	2 Mbps
<b>Consumo de potencia</b>	No especificado
<b>Modulación</b>	QPSK y OQPSK
<b>Corrección de errores</b>	Códigos convolucionales
<b>Fuente de alimentación</b>	6 – 12 Volts
<b>Temperatura de operación</b>	-25 a +61 C
<b>Masa</b>	95 grams
<b>Dimensiones</b>	90.2 x 96 mm
<b>Interfaces</b>	I2C, SPI
<b>Salida RF</b>	SMA 50 ohm
<b>Experiencia de vuelo</b>	No especificado
<b>Precio</b>	8,900.00 USD

### 3.4.3 Modem Microhard n2420

Los módems de la empresa canadiense Microhard han sido utilizados en un gran número de misiones CubeSats (como se puede ver en la tabla 1.1), particularmente el MHX-2420 ha sido utilizado dada su gran cantidad de prestaciones, lo que lo vuelven muy flexible para poderlo adaptar a los requerimientos de misión, el n2420 es un modulo OEM (Original Equipment Manufacturer) con la misma arquitectura del MHX-2420 (modelo discontinuado), con la diferencia de que es más pequeño, ligero y puede ser montado en diferentes PCB (Printed Circuit Board) de desarrollo.

Un dato muy importante a tomar en cuenta es que su precio de mercado es muy inferior al precio de sistemas banda S que venden otras empresas. Este precio se ve drásticamente reducido debido a que no cuenta con el recubrimiento para soportar bombardeo de partículas de alta energía, sin embargo para la misión de vuelo de unos cuantos meses, esta limitante resulta ser de poca gravedad.

En la figura 3.5 se muestra el modem n2420, el cual cuenta con una carcasa metálica de protección, en la imagen se muestra montado en una tarjeta de desarrollo también de la empresa Microhard.



Figura 3.5 Radio Banda S de Microhard, modelo n2420 montado en tarjeta de desarrollo nano motherboard [14]

En la tabla 3.3 se muestran resumidas las principales características técnicas que tiene el radio de banda S de la compañía Microhard.

Tabla 3.3 Especificaciones técnicas del modem n2420 de la empresa Microhard [15]

CARACTERISTICAS Y DATOS IMPORTANTES	
<b>Frecuencia de operación</b>	2.4000 - 2.4835 GHz
<b>Potencia de salida máxima</b>	100mW - 1W (20 - 30dBm)
<b>Data rate</b>	Hasta 230.4kbps
<b>Consumo de potencia</b>	≤ 1300 mA
<b>Modulación</b>	GFSK
<b>Fuente de alimentación</b>	7 – 30 Volts
<b>Corrección de errores</b>	Hamming BCH Golay Reed-Solomon
<b>Detección de errores</b>	32 bits of CRC, ARQ
<b>Masa</b>	19 grams OEM, 43 grams Tarjeta de desarrollo
<b>Encriptación</b>	AES, AES256
<b>Sensibilidad</b>	-107 dBm @ 10-6
<b>Temperatura de operación</b>	-40C a +85C
<b>Dimensiones</b>	32x51x6.35 mm OEM 90.2 x 96 mm Tarjeta de desarrollo
<b>Interfaces</b>	RS232/RS485/RS422 TTL Driver Level
<b>Precio</b>	990.00 USD

### 3.5 Selección del sistema en Banda S

En la tabla 3.4 se muestra el comparativo de los tres sistemas de comunicación en banda S comerciales analizados, en dicha tabla aparecen los parámetros en que mas difieren los tres subsistemas y que pueden ser decisivos para escoger uno de ellos. A pesar de que todos los sistemas de comunicaciones aquí comparados son de excelente reputación, nos hemos inclinado por trabajar con el radio n2420 por 2 factores importantes: el costo y la facilidad en la adquisición. Ya que los tiempos de entrega de los sistemas ISIS y Clyde Space son muy grandes.

*Tabla 3.4 Tabla comparativa de los sistemas de comunicación en banda S analizados en el proceso de selección del subsistema de comunicaciones para el nanosatélite universitario.*

	ISIS TXS	CS-CPUT-STX-01	n2420
<b>Data rate máximo</b>	100 kbps	2 Mbps	230.4 kbps
<b>Consumo de potencia</b>	$\leq 4$ W	No especificado	$\leq 1300$ mA
<b>Modulación</b>	BPS o GMSK	QPSK y OQPSK	GFSK
<b>Temperatura de operación</b>	-20 a +60 C	-25 a +61 C	-40C a +85C
<b>Interfaces</b>	I <sup>2</sup> C	I2C, SPI	RS232/RS485 /RS422
<b>Experiencia de vuelo</b>	No especificado	No especificado	Si
<b>Precio</b>	€ 8,500.00	8,900.00 USD	990.00 USD

### 3.6 Hardware del modem n2420

En la figura 3.6 se muestra el diagrama a bloques del modem que utilizaremos para envío y descarga de imágenes satelitales, este es un modem fabricado por la empresa Microhard Systems, el cual opera en la banda ISM de 2.4000 a 2.4835 GHz. El módem ya se ha utilizado en otras misiones espaciales [17], [18], [19], utiliza un esquema de modulación es conocido como FHSS (espectro disperso por salto en frecuencia). Este modem puede transmitir hasta 1 Watt (30 dBm o 0 dB) de potencia de RF, y tiene una sensibilidad de -107 dBm (-137 dB) con un poco tasa de error (BER) de  $1 \times 10^{-6}$ .

Otras ventajas del n2420 es el intervalo de tiempo relativamente lento para realizar el salto en frecuencia, cuenta con un tamaño compacto y una flexibilidad operativa. El equipo tiene incorporadas características como abordar, protocolos de retransmisión, cifrado y FEC. Usa la modulación por desplazamiento en frecuencia gaussiana (GFSK) y se pueden seleccionar 20 patrones diferentes de salto en frecuencia pseudo-aleatorias.

El módulo n2420 está diseñado para conectarse a circuitería lógica externa a través 3.3V (RS-232), y a una antena a través de un conector 50-Ohm MCX.

Como se ve en la figura 3.5. La interfaz eléctrica del n2420 es simple y permite una rápida integración. Se comunica con el procesador a través de un puerto con velocidades de datos seleccionables de hasta 115,200 baudios.

Este módem puede estar integrado en la estación terrena sin ningún equipo receptor o transmisor por separado, ya que el módem de forma transparente, realiza la corrección de desplazamiento Doppler hasta 60 KHz, automáticamente selecciona los canales y detecta la frecuencia del enlace. El n2420 transmite una señal cercana a 200 kHz de ancho de banda mientras que el ancho de banda del receptor es de aproximadamente 400 kHz. Se podría pensar que esta característica en el receptor es ineficiente, debido al aumento en el nivel de ruido que entra en la unidad, sin embargo se puede permitir mayores desplazamientos Doppler.

La figura 3.6 muestra el diagrama a bloques de los elementos que conforman el n2420, en las secciones siguientes se hablara sobre los diferentes circuitos electrónicos que integran el modem.

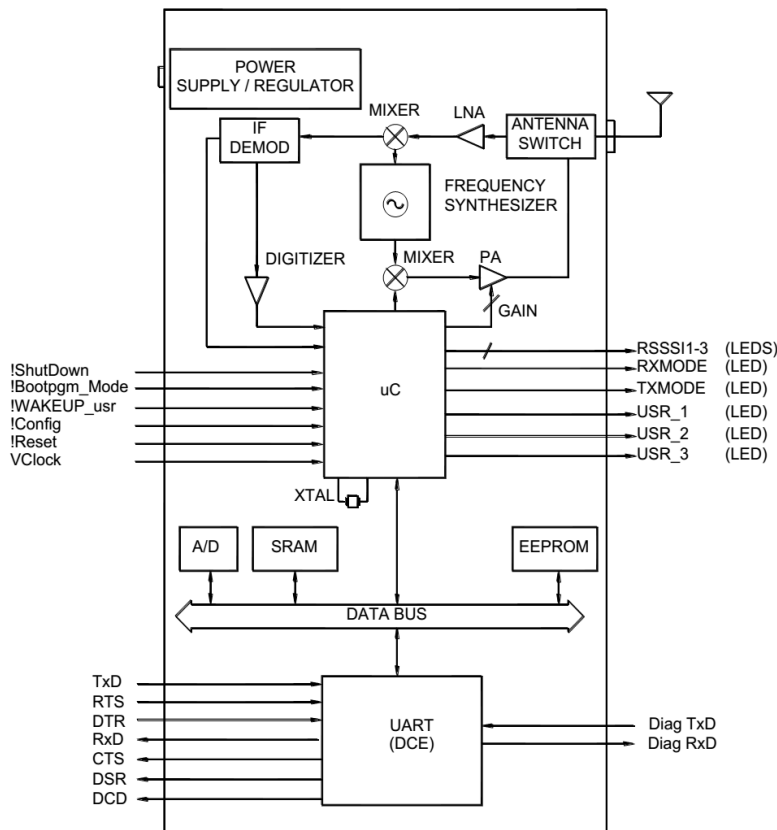


Figura 3.6 Diagrama a bloques del modem n2420 de la empresa Microhard [14]

### 3.6.1 UART del n2420

En la figura 3.7 se muestra el diagrama a bloques de la UART (transceptor universal asíncrono) del n2420, la interfaz serie está formada por pines de datos (TxD y RxD) y de control (RTS, DTR, CTS, DSR y DCD) los cuales se conectan a un circuito SN65C3243 que adapta los niveles de voltaje para que cumpla con el estándar RS-232 (este circuito integrado forma parte de la nano motherboard).

Por otro lado, la UART se conecta directamente al bus de datos de 8 bits, por lo que puede comunicarse con la EEPROM, la SRAM, la A/D y el microcontrolador.

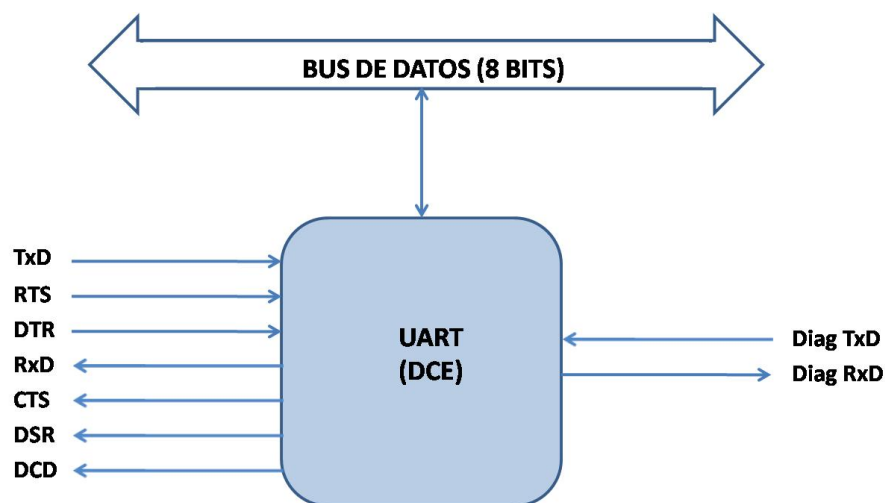


Figura 3.7 Diagrama a bloques de la UART del n2420 [14]

### 3.6.2 Etapa del receptor del n2420

Los niveles de potencia de la señal recibidos por la antena de banda S son del orden de -100 dbm, tomando en cuenta que los dispositivos que más ruido introducen al sistema son los que se encuentran en las primeras etapas del sistema receptor, entonces es necesario tener un amplificador de bajo ruido, también llamado LNA (del inglés Low Noise Amplifier), este dispositivo permite alcanzar una sensibilidad de -107dBm. En la figura 3.8 se puede observar la etapa del receptor en banda S, usa un LNA que es directamente conectado a la antena a través de un switch, el cual por ser un dispositivo de elevado aislamiento, introduce un nivel de ruido despreciable, el receptor está constituido por un sistema heterodino el cual puede ofrecer grandes rangos dinámicos de trabajo. .

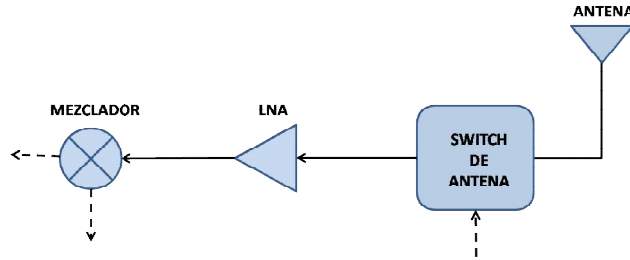


Figura 3.8 Amplificador de bajo ruido (LNA) para microondas, utilizado en modem n2420 [14]

### 3.6.3 Mezclador

El mezclador recibe la señal de radiofrecuencia del LNA y la traslada a una frecuencia intermedia (operación de heterodinización) utilizando la señal que le proporciona el oscilador local. Un mezclador es básicamente un amplificador no lineal con una salida sintonizada a una frecuencia que es la diferencia entre la frecuencia de la señal de información y la del oscilador local, matemáticamente se puede expresar como [16]:

$$V_{\text{salida}} = (\text{sen } 2\pi f_{\text{rf}}t)(\text{sen } 2\pi f_{\text{lo}}t) \quad (3.1)$$

Donde:  $f_{\text{rf}}$ : frecuencia de radio que entra

$f_{\text{lo}}$ : frecuencia del oscilador local

Utilizando la identidad trigonométrica para el producto de dos senos

$$V_{\text{salida}} = \frac{1}{2} \cos[2\pi(f_{\text{rf}} - f_{\text{lo}})t] - \frac{1}{2} \cos[2\pi(f_{\text{rf}} + f_{\text{lo}})t]$$

La frecuencia intermedia ( $f_{\text{rf}} - f_{\text{lo}}$ ) se obtiene del primer término coseno, la frecuencia suma se elimina al aplicar un filtro pasa bajas, en la figura 3.9 ya está incluido dicho filtro en el símbolo del Mezclador.

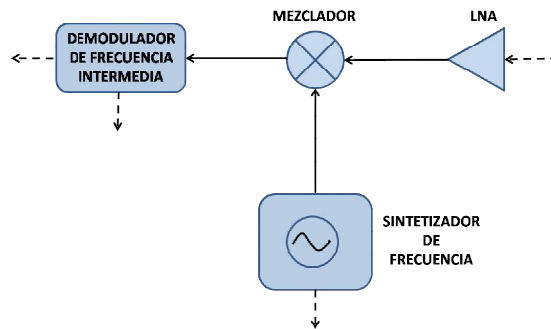


Figura 3.9 Mezclador [6]

### 3.6.4 Etapa del transmisor

El transmisor está constituido como se muestra en la figura 3.10, cuenta con un amplificador de potencia el cual se conecta con la antena a través de un switch, el tiempo de conmutación entre el amplificador de bajo ruido y el de potencia se puede controlar por software. La potencia de salida también se puede controlar por software y puede tomar valores desde 20dBm (100mW) hasta 30dBm (1W). La selección de frecuencias pseudo aleatorias en las que conmuta el amplificador de potencia también se pueden programar por software.

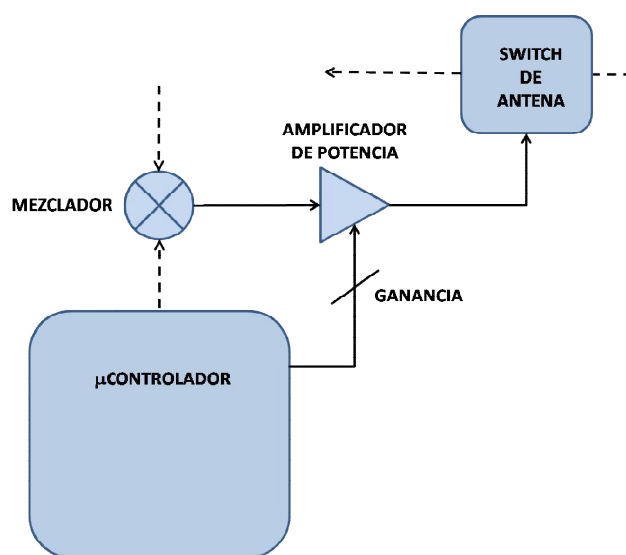


Figura 3.10 Etapa del transmisor [14]

## 3.7 Modos de operación del n2420

El modem n2420 puede operar en dos modos fundamentales: el modo de comando y el modo de datos los cuales se describirán a continuación.

### 3.7.1 Modo de comando

Este modo de operación nos permite configurar el modem así como visualizar los diferentes valores de los parámetros ya configurados previamente, esto se realiza utilizando los comandos “AT”, para entrar en este modo de operación existen dos métodos [14]:

- i) Con el modem apagado, conectamos nuestra PC utilizando el puerto RS232, ponemos en marcha una terminal (por ejemplo hyperterminal) configurada a una velocidad de 9600bps, 8 bits de datos, sin paridad, 1 bit de parada (8N1).
- ii) Estando en el modo datos, hacemos una pausa de 1 segundo, escribimos los caracteres '+++', esperamos un segundo, después del cual debe de aparecer el mensaje 'NO CARRIER OK' en nuestra terminal (por ejemplo hyperterminal) conectada por el puerto RS232.

### 3.7.2 Modo datos

Este es el modo normal de operación del modem, en este modo es en el que se mandan los datos al modem para que este los transmita siguiendo los parámetros almacenados en sus registros, para pasar del modo comando al modo datos, se debe de escribir el comando "ATO" seguido de ENTER

### 3.8 Registros más importantes del n2420

Los registros que nos interesan para el enlace satelital son:

- **Registro S2, Carácter de escape.** Especifica el carácter que será usado como carácter de escape, si bien el carácter de escape predeterminado es el "+", puede ser necesario cambiar dicho carácter por incompatibilidad con algún equipo con el que se conecte el modem. Los valores permitidos son cualquier valor ASCII a partir del carácter numero 43.
- **Registro S102, Velocidad del Serial.** Es la velocidad de transmisión del puerto serial a la que el módem se comunica con el equipo terminal de datos (DTE).

VALORES PERMITIDOS y velocidad correspondiente en bps			
<b>0</b>	230400	<b>8</b>	7200
<b>1</b>	115200	<b>9</b>	4800
<b>2</b>	57600	<b>10</b>	3600
<b>3</b>	38400	<b>11</b>	2400
<b>4</b>	28800	<b>12</b>	1200
<b>5</b>	19200	<b>13</b>	600
<b>6</b>	14400	<b>14</b>	300
<b>7</b>	9600		



- **Registro S103, Velocidad del Enlace.** Este registro determina la velocidad a la que las comunicaciones de RF se producirán través de una red dada. Todos los módems dentro de una red particular, deben configurarse con la misma velocidad de enlace inalámbrico. Más rápidas velocidades de enlace resultan en un mayor rendimiento, sin embargo, por cada aumento en la tasa de enlace, hay una reducción de aproximadamente 1 dB en la sensibilidad.

VALORES PERMITIDOS	
1	115200
2	172800
3	230400

- **Registro S108, Potencia de Salida.** Esta configuración establece el nivel de potencia de transmisión que será mandada a la antena en la parte trasera del módem.

VALORES PERMITIDOS y potencia correspondiente en mW			
20	100	26	400
21	125	27	500
22	160	28	630
23	200	29	800
24	250	30	1000
25	320		

- **Registro S110, Formato de Datos.** Este registro determina el formato de los datos en el puerto serie.

VALORES PERMITIDOS			
1	8N1	6	7N2
2	8N2	7	7E1
3	8E1	8	7O1
4	8O1	9	7E2
5	7N1	10	7O2

- **Registro S111, Tamaño mínimo de paquete.** define el número mínimo de bytes a recibir del DTE antes de encapsular en un paquete y transmitir de forma inalámbrica. Este registro puede tomar valores desde 1 hasta 255.
- **Registro S112, Tamaño máximo de paquete.** Determina el número máximo de bytes que serán encapsulados en un paquete. Los paquetes grandes tienen una mayor eficiencia de transmisión; Sin embargo, un paquete pequeño es menos susceptible a dañarse, si lo hace, se retransmite con un menor impacto en el tráfico de red. Los valores permitidos para este registro son desde 0 hasta 255.

- **Registro S113**, Retransmisión de paquetes. Este registro determina la cantidad máxima de veces que un paquete será retransmitido (además de la transmisión inicial), tomando nota de los siguientes comportamientos específicos en diversas topologías de red, este registro puede tomar valores desde 0 hasta 255.
- **Registro S116**, Tiempo de espera de caracteres. Este 'temporizador' busca lagunas en los datos que se reciben desde el DTE. El temporizador se activa después de que el paquete de tamaño mínimo (registro S111, por defecto 1 Byte) se ha acumulado en el módem, después, si el temporizador detecta una brecha en los datos que excedan el valor de tiempo de espera de caracteres, el módem transmitirá los datos.  
El n2420 acumulará datos en sus buffers hasta que:
  - a) El tamaño máximo de paquete (configurado con registro S112) se ha acumulado, o.
  - b) Un paquete de tamaño mínimo (configurado con registro S111) se ha acumulado y el tiempo de espera de caracteres ha expirado, lo que ocurra primero.
 Si S116 se establece en 0, el módem recibirá exactamente el tamaño mínimo de paquetes y luego transmitirá esos datos. Los valores permitidos para este registro son desde 0 hasta 254.
- **Registro S158**, Seleccionar FEC. Utilizando FEC el modem puede corregir errores, esto se logra agregando información redundante, esto evita que los paquetes sean retransmitidos, especialmente útil para grandes distancias de transmisión.

VALORES PERMITIDOS	
0	Sin FEC
1	Hamming (7,4)
2	Hamming (15,11)
3	Hamming (31,24)
5	BCH binario (47,36)
6	Golay (23,12,7)
7	Reed-Solomon (15,11)

**Registro S232**, Tamaño máximo de Buffer. Este registro define el número máximo de paquetes enviados por el puerto serie que se pueden almacenar en la memoria intermedia. Los valores posibles para este registro van desde 1 hasta 255.

# CAPÍTULO

# 4

## *Conexión del Subsistema en Banda S con otros Subsistemas satelitales*

### **4.1 Introducción**

En este capítulo se presentan brevemente los elementos principales que constituyen a la tarjeta de desarrollo del sistema de comunicación en Banda S del nanosatélite universitario, también de la antena para banda S (antena Rómbica de cruz) y la cámara o carga útil del satélite.

La estación terrena utilizará un modem igual al montado en el nanosatélite, la diferencia es que este modem no sufrirá ningún tipo de modificación en hardware, el modem de la estación terrena se conecta al DTE (computadora de escritorio o laptop) por medio de un cable adaptador Serie-USB y recibirá del espacio la señal utilizando una antena parabólica.

El transceptor n2420 utilizado en este proyecto, contiene comandos llamados tipo AT, estos permiten establecer una determinada configuración, entre las principales están el definir el modo Maestro, Esclavo, Repetidor, escribir la configuración en memoria, solicitud de identificación, Reset y cargar la configuración almacenada, Data Carrier Detect, HandShaking, etc. Contiene una serie de registros en los que es posible configurar la velocidad de transmisión de datos seriales, definir una dirección de red, colocar una clave de encriptación, establecer la potencia de transmisión, establecer el intervalo de cambio en frecuencia, la cantidad de paquetes mínimo y máximo, duración del ciclo TDMA. También permite mediante un comando específico operar en modo analizador de espectros, en este modo se realiza un barrido en todo el espectro de trabajo para leer la potencia de la señal de salida en dBm para cada canal, esta lectura puede ser de gran utilidad para fines de ajuste y monitoreo del sistema transmisor de manera directa. Otro comando muy útil es el que permite ver el estado estadístico del número

de paquetes de datos enviados, recibidos, errores de sincronización, errores de CRC y paquetes perdidos en el Esclavo.

La antena de la estación terrena deberá estar lo más arriba del suelo posible (30m) con esta acción se tendrá menor interferencia de ruido de piso de otras señales de la banda libre de 2.4 GHz. Estamos recomendando el utilizar una pantalla o rejilla metálica en forma de jaula de Faraday que permita reducir la contribución de señales indeseadas en sistemas cercanos (Zigbee, Wlan, LTE, Bluetooth, WiMAX, etc)

## 4.2 Interfaces del modem n2420

El modem n2420 es un pequeño modulo OEM de 5.1 cm de largo, 3.2 cm de ancho y 0.79 cm de alto, cuenta con un conector de RF MMCX hembra el cual sirve para conectar el cable que va a la antena y un conector AVX-Kyocera 5046 de 60 pines, los cuales se muestran en la figura 4.1b, el modulo n2420 proporciona todas las señales necesarias para que pueda ser integrado y adaptado a nuestras necesidades y permite maximizar eficientemente los requerimientos de espacio y energía, sin embargo existen módulos complementarios y kits de desarrollo en los cuales se puede montar y hacer más fácil su programación e integración, un ejemplo es la nano motherboard de la cual se hablará en el siguiente apartado.

El modem n2420 maneja lógica digital de 3.3 Volts internamente y en la interfaz AVX-Kyocera 5046, los módulos complementarios entre otras funciones realizan la conversión de ese voltaje y el modem pueda ser conectado a diferentes voltajes de alimentación e interfaces de comunicación.



Figura 4.1 Modem comercial n2420 de Microhard Systems Inc [20] a) Vista frontal, b) Vista posterior donde podemos observar el conector AVX-Kyocera 5046 de 60 pines y el conector MMCX

En la figura 4.2 se muestra el conector AVX-Kyocera 5046 con los nombres de cada uno de sus pines según son utilizados por el modem n2420, el modem consume como máximo 1500 mA cuando transmite [14]. En la figura se puede observar que hay cinco pines destinados para Vcc (51, 53, 55, 57 y 59) y cinco pines para GND (52, 54, 56, 58 y 60), con esto se evita sobrecalentamiento. También hay 14 pines marcados para uso futuro (posteriores funciones que implementará el fabricante), 4 pines no conectados, 5 pines reservados para uso del fabricante y 27 pines que tienen alguna función implementada y reciben o transmiten alguna señal con lógica de 3.3 Volts.

NC	□ 2	1	□ Ethernet LED0 (Future)
NC	□ 4	3	□ Ethernet LED1 (Future)
NC	□ 6	5	□ Vclock
NC	□ 8	7	□ !Bootpgm_mode
CAN+/CAT6 (Future)	□ 10	9	□ USR_AN0
CAN-/CAT3 (Future)	□ 12	11	□ !WAKEUP_usr
CAT2 (Future)	□ 14	13	□ !CONFIG
CAT1 (Future)	□ 16	15	□ !RESET
Control RxD	□ 18	17	□ Vbat
Control TxD	□ 20	19	□ RSMMode
LED_RX	□ 22	21	□ USB_DDM (Future)
LED_TX	□ 24	23	□ USB_CNx (Future)
RSSI3_LED	□ 26	25	□ USB_DDP(Future)
RSSI2_LED	□ 28	27	□ Reserved
RSSI1_LED	□ 30	29	□ Reserved
Serial CTS	□ 32	31	□ Reserved
Serial RTS	□ 34	33	□ Reserved
Serial DSR	□ 36	35	□ USR_1/ 1PPS
Serial RING	□ 38	37	□ USR_2
Serial DTR	□ 40	39	□ USR_3
Serial TxD	□ 42	41	□ Mode Line(Future)
Serial RxD	□ 44	43	□ 5V/8V (Future)
Serial DCD	□ 46	45	□ 5V/8V (Future)
Reserved	□ 48	47	□ 5V/8V (Future)
USR_SCK	□ 50	49	□ 5V/8V (Future)
GND	□ 52	51	□ Vcc (3.3V)
GND	□ 54	53	□ Vcc (3.3V)
GND	□ 56	55	□ Vcc (3.3V)
GND	□ 58	57	□ Vcc (3.3V)
GND	□ 60	59	□ Vcc (3.3V)

Nano Series

Figura 4.2 Pines del conector AVX-Kyocera 5046 según son utilizados por el modem n2420 [14]

En la tabla 4.1 se muestra una breve descripción de los pines que pueden ser utilizados por un diseñador para realizar una tarjeta que interactúe con el módulo n2420. En nuestro caso necesitamos conocer dichos pines para entender cómo funciona la tarjeta de desarrollo o nano motherboard (que se describe en el siguiente apartado) y poder realizar las adaptaciones necesarias para que pueda interactuar con los demás subsistemas del nanosatélite universitario.

*Tabla 4.1 Breve descripción de los pines del conector AVX-Kyocera 5046 que reciben o transmiten algún tipo de señal*

No.	Nombre de PIN	Descripción	Tipo
5	Vclock	Reloj en tiempo real para sacar al modem del modo "sleep" y ponerlo en marcha, este pin se puede dejar desconectado.	Entrada
7	!Bootpgm_Mode	Señal que se pone a GND para indicar al modem que se descargará un nuevo firmware en el módulo. Se deja desconectado o conectado a Vcc si no se utilizará.	Entrada
11	!WAKEUP_usr	Pin utilizado para reactivar el modulo, lo saca del modo suspensión.	Entrada
13	!CONFIG	Pin utilizado para poner al modulo en modo de comunicación por default, habilita la comunicación por RS-232 (9600bps, 8-N-1)	Entrada
15	!RESET	Utilizado para restablecer el módulo	Entrada
17	Vbat	Tensión de la batería de línea de entrada analógica.	Entrada
19	RSMODE	Indica cuando el modulo sale del modo sleep	Salida
18	Control RxD	Los datos de diagnóstico Rx. Salida de nivel lógico a una PC o terminal.	Salida
20	Control TxD	Los datos de diagnóstico Tx. Entrada de nivel lógico desde un PC o terminal al Nano.	Entrada
22	LED_RX	Salida que indica recibiendo o estado de sincronización.	Salida
24	LED_TX	Salida indica que el módulo está transmitiendo datos a través del canal de RF.	Salida
26	RSSI3_LED	Indicador de cobertura	Salida
28	RSSI2_LED	Recibe Indicador de intensidad de señal 2.	Salida
30	RSSI1_LED	Recibe la señal del indicador de potencia 1.	Salida
32	Serial CTS	Cancela el envío de datos. Se utiliza para los propósitos de toma de contacto.	Salida
34	Serial RTS	Solicita el envío de datos	Entrada
36	Serial DSR	Conjunto de datos preparado	Salida
38	Serial RING	Señal utilizada para la iniciación de la transferencia de datos desde el módem al dispositivo de usuario.	Salida
40	Serial DTR	Terminal de datos preparado	Entrada
42	Serial TxD	Entrada de datos lógicos	Entrada
44	Serial RxD	Salida de datos lógicos.	Salida
46	Serial DCD	Portadora de datos detectada. Señal baja si está transmitiendo.	Salida
35	USR_1/PPS	Indicador de estado del sistema.	Salida
50	USR_SCK	Reloj de sincronización del usuario. Requerido para la transferencia de datos de alta velocidad.	Entrada

### 4.3 Nano Motherboard y sus interfaces

La nano Motherboard es una tarjeta de desarrollo diseñada para interactuar tanto con los modem n9290 (900MHz) como con los n2420 (2.4GHz), esta es una tarjeta robusta que tiene los puertos seriales de comunicación RS232 y RS422/485 con la computadora, una fuente de alimentación que acepta voltajes entre 9 y 30 V para entregar un voltaje al modem de 3.3 V, un interruptor de reset, botón de configuración, conector coaxial para la antena de banda S y una serie de leds que marcan el estatus del radio (modo recepción/transmisión, modo comando y modo datos).

La tarjeta Nano Motherboard (mostrada en las figuras 4.3a y 4.3b) tiene las dimensiones adecuadas para caber en el estándar CubeSat, ya que mide aproximadamente 8.9 x 6.35 x 1.44 cm.



Figura 4.3 Nano Motherboard [14], a) Vista frontal, b) Vista posterior

#### 4.3.1 Puerto de datos (RS232)

En la vista posterior de la tarjeta de desarrollo está el puerto de datos y la interfaz RS485/422.

El puerto de datos (RS232) es utilizado para comunicación serial de datos cuando el modem está en MODO DATO o para configúralo cuando está en MODO COMANDO, en la tabla 4.2 se pueden ver la descripción de sus pines

Tabla 4.2 Pines del puerto de datos RS232 de la tarjeta de desarrollo [14]

Nombre de señal	PIN #	Entrada o Salida
DCD	1	Salida
RXD	2	Salida
TXD	3	Entrada
DTR	4	Entrada
SG	5	
DSR	6	Salida
RTS	7	Entrada
CTS	8	Salida
RING	9	Salida

### 4.3.2 El puerto RS422/485

Este puerto es usado para energizar la tarjeta de desarrollo a través de los pines 1 y 2, los cuales pueden aceptar un gran rango de voltajes de corriente directa (9-30 volts), este puerto también puede utilizarse para el tráfico de datos. En la tabla 4.3 se observan los pines correspondientes al puerto RS422/485

Tabla 4.3 Pines del puerto de datos RS485/422 de la tarjeta de desarrollo [14]

Nombre de señal	PIN #	Entrada o Salida
Vin +	1	Entrada
GND	2	
RxA (R-)	3	Entrada
RxB (R+)	4	Entrada
TxA (D-)	5	Salida
TxB (D+)	6	Salida

## 4.4 Computadora de Vuelo

El nanosatélite cuenta con dos computadoras de vuelo [21], una principal y una secundaria, en caso de falla de la primaria entraría en funcionamiento la secundaria; ambas computadoras están basadas en microcontroladores de la empresa Texas Instruments, la computadora principal está basada en el microcontrolador TMS570LS1227 de la familia HERCULES TMS570 y la computadora secundaria en el microcontrolador MSP430F1612 de la familia MSP430.



#### 4.4.1 Microcontrolador TMS570LS1227

Este microcontrolador es de grado automotriz de alto rendimiento para sistemas de seguridad, cuenta con muchas características de tolerancia a fallas, lo cual permite la corrección en tiempo de ejecución de varias condiciones de error que pudieran presentarse, algunas de sus aplicaciones son [22]:

- Sistemas de frenado (ABS y ESC)
- Dirección asistida eléctricamente (EPS)
- Aeroespacial y Aviónica
- Comunicaciones ferroviarias
- Sistemas de manejo de baterías

En la tabla 4.4 se muestran algunas especificaciones del microcontrolador TMS570LS1227 de Texas Instruments.

*Tabla 4.4 Algunas de las especificaciones técnicas más importantes del microcontrolador TMS570LS1227 de Texas Instruments [22]*

CARACTERISTICAS Y DATOS IMPORTANTES	
<b>CPU</b>	ARM Cortex-R4F (CPU Dual) -bus de 32 bits -arquitectura RISC
<b>Reloj de sistema</b>	Hasta 180 MHz
<b>Voltaje de alimentación de núcleo</b>	1.14 a 1.32 Volts
<b>Voltaje de alimentación y puertos I/O</b>	3.0 a 3.6 Volts
<b>Memoria de programa (Flash)</b>	1.25 MB
<b>Memoria RAM</b>	192 KB
<b>Memoria EEPROM emulada (Flash)</b>	64 KB
<b>Pines con capacidad de generar interrupciones</b>	16 Pines de I/O de propósito general
<b>Interfaces de comunicación</b>	-UART -MibSPI -SPI -I2C -Ethernet 10/100 Mbps -FlexRay Controller -CAN Controller
<b>Temperatura de operación</b>	-40 °C a 125 °C
<b>Encapsulado</b>	QFP (Quad Flat Package) 144 pines

La arquitectura de seguridad incluye dos CPU's trabajando al mismo ritmo con dos ciclos de reloj de separación entre ambas, su salida es conectada a un comparador, el cual manda una señal de error y en caso necesario, se implementan códigos de corrección de errores tanto en memoria flash como en

SRAM de datos, permite la verificación de paridad en memorias periféricas y tiene la capacidad de loopback en los periféricos de I/O.

También cuenta con periféricos para aplicaciones de tiempo real e interfaces de entrada-salida como son dos High-End-Timer de próxima generación (N2HET), siete moduladores por ancho de pulso mejorados (ePWM), seis módulos de captura mejorada (ECAP), dos codificadores de pulsos en cuadratura mejorados (eQEP), dos convertidores analógico-digital (ADC), dos interfaces UART (una interconectada a la red local), tres interfaz MibSPI, dos interfaz SPI, una interfaz I2C y una interfaz Ethernet MAC (EMAC). Para la realización de esta tesis nos interesa particularmente la interface de comunicación UART que nos permitirá comunicarnos con el sistema en Banda S para enviar las imágenes satelitales a estación terrena, en el encapsulado del TMS570LS1227 el receptor UART (SCIRX) está ubicado en el pin 38 y el transmisor UART (SCITX) en el pin 39 con una corriente máxima de salida de 8mA, ambos pines son programables.

Este microcontrolador irá montado en una tarjeta PCB (Printed Circuit Board) de 92 x 95 mm.

#### 4.4.2 Microcontrolador MSP430F1612

La familia de microcontroladores MSP430 de Texas Instruments son dispositivos de muy bajo consumo de energía, utilizados particularmente para aplicaciones autosuficientes como por ejemplo sistemas de sensores de bajo costo que captan señales analógicas para procesarlas y transmitir las. Cada microcontrolador de esta familia ofrece diferentes conjuntos de periféricos específicos para ser implementados en diferentes aplicaciones. El microcontrolador está diseñado con una arquitectura Von-Neumann lo que implica que datos e instrucciones comparten el mismo mapa de memoria, cuenta con una CPU RISC (Reduced Instruction Set Computer) de 16 bits, sus registros también son de 16 bits, se programa utilizando un conjunto corto de instrucciones (27 instrucciones), lo que permite el uso de cualquier modo de direccionamiento para cualquier instrucción, aumentando la eficiencia de compiladores de lenguajes de alto nivel como C.

La CPU tiene cuatro registros dedicados y doce registros de trabajo, permitiendo el ahorro de ciclos de reloj al almacenar los valores de uso frecuente y variables en dichos registros en lugar de en memoria RAM. Se comunica con el exterior por medio de 6 puertos de entrada salida de 8 bits cada uno, los cuales se pueden habilitar o inhabilitar individualmente.

En la tabla 4.5 aparecen algunas de las características más importantes del microcontrolador en mención.

*Tabla 4.5 Algunas de las especificaciones técnicas más importantes del microcontrolador MSP430F1612 de Texas Instruments [23]*

CARACTERISTICAS Y DATOS IMPORTANTES	
<b>CPU</b>	-bus de 16 bits -arquitectura RISC
<b>Reloj de sistema</b>	Hasta 8 MHz
<b>Voltaje de alimentación y puertos I/O</b>	1.8 a 3.6 Volts
<b>Memoria de programa (Flash)</b>	55 KB
<b>Memoria RAM</b>	5 KB
<b>Memoria EEPROM emulada (Flash)</b>	256 B
<b>Interfaces de comunicación</b>	-UART -SPI -I2C
<b>Temperatura de operación</b>	-40 °C a 85 °C
<b>Encapsulado</b>	QFP (Quad Flat Package) 64 pines

#### 4.5 Antena de microcinta rómbica de cruz para Banda S

Para la realización de este proyecto en la ESIME-ZACATENCO del Instituto Politécnico Nacional se ha diseñado una antena llamada rómbica de cruz [24] para la frecuencia de banda S que irá montada en el nanosatélite.

La tecnología utilizada para realizar la antena de microcinta permite que las antenas sean de un tamaño reducido, en este caso sus dimensiones son de 9.5 x 9.5 cm como se muestra en la figura 4.4a, este tamaño resulta ser adecuado para el estándar CubeSat, el cual especifica que la unidad básica es un cubo de 10x10x10 cm. La antena tiene un peso de 124 gramos.

El nanosatélite universitario es un CubeSat 3u, es decir es un paralelepípedo de 10x10x30 cm, la antena rómbica de cruz irá montada en una de las caras laterales de dicho CubeSat. Como se puede observar en la *Figura 4.4b*, la antena cuenta con un conector sma hembra, el cual irá conectado a la salida del modem por medio de un cable coaxial.

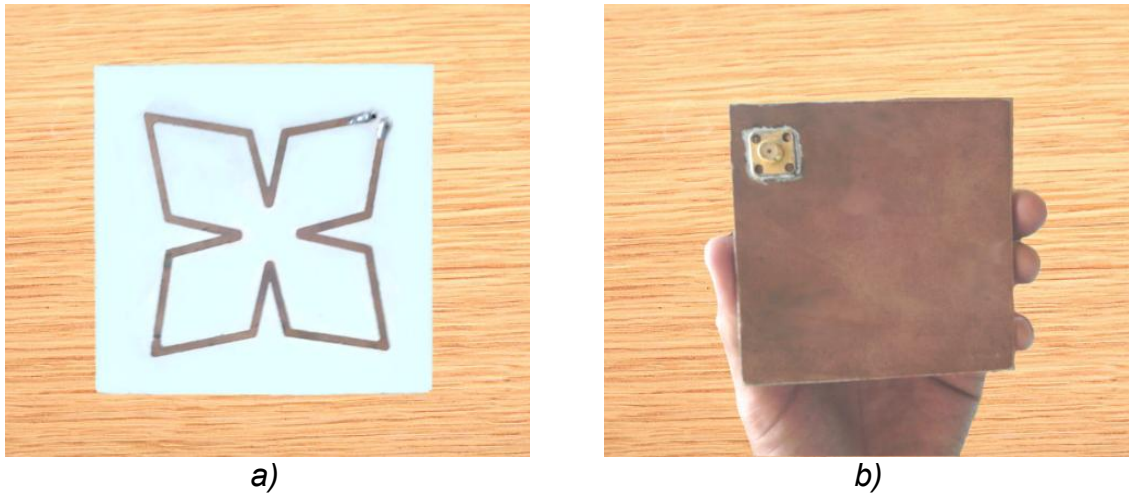


Figura 4.4. Antena de microcinta del nano satélite universitario a) Vista frontal, b) Vista posterior, donde podemos observar el conector sma de dicha antena.

Cabe mencionar que la antena rómbica de cruz tiene una polarización circular derecha. Esto la hace muy atractiva para aplicaciones espaciales ya que en el segmento terrestre se pueden reducir las pérdidas en el receptor debidas al cambio de polarización provocado por la atmosfera y que pueden compensarse con otra antena receptora de polarización circular. En la figura 4.5 se observa la ganancia simulada y medida de la antena rómbica de cruz, esta tiene una ganancia para el rango de frecuencias de 2.4 a 2.48GHz que va de 8 a 4 dB respectivamente.

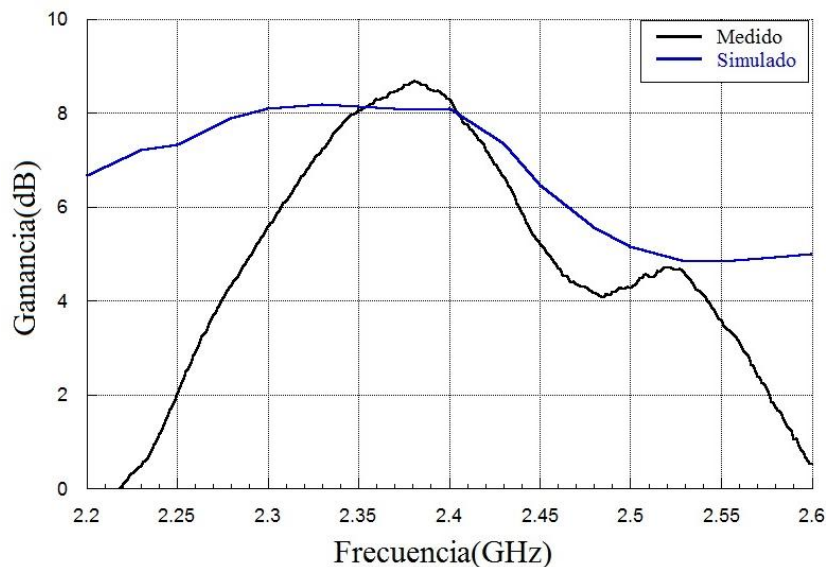


Figura 4.5 Ganancia medida y simulada en el software CST de la antena rómbica de cruz [24]

En la figura 4.6 se observa el patrón de radiación medido a la frecuencia central de 2.44 GHz en una cámara anecoica. Se presenta en ambos planos: el plano horizontal y el vertical. El lóbulo principal tiene un ancho de haz de  $60^\circ$  de cobertura, el cual está ligeramente desviado de  $0^\circ$  este parámetro nos indica pues que el máximo de radiación se está efectuando entre de  $0^\circ$  a  $30^\circ$  y de  $0^\circ$  a  $330^\circ$ . La radiación de los lóbulos traseros es mínima.

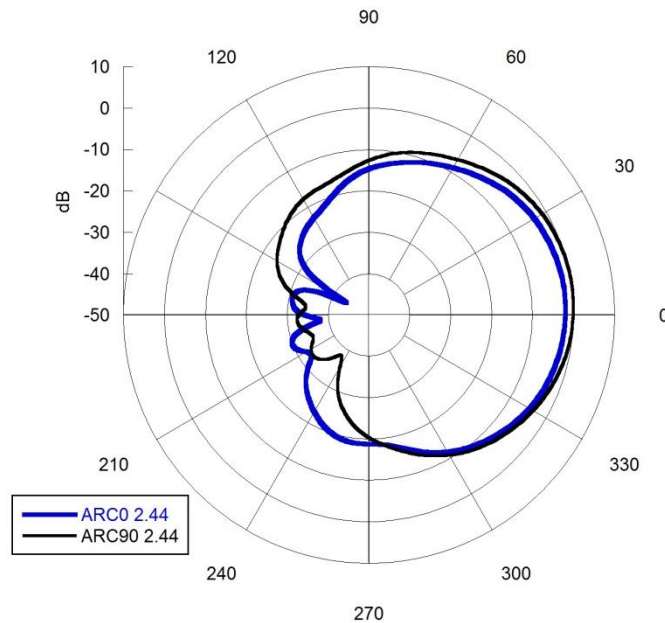
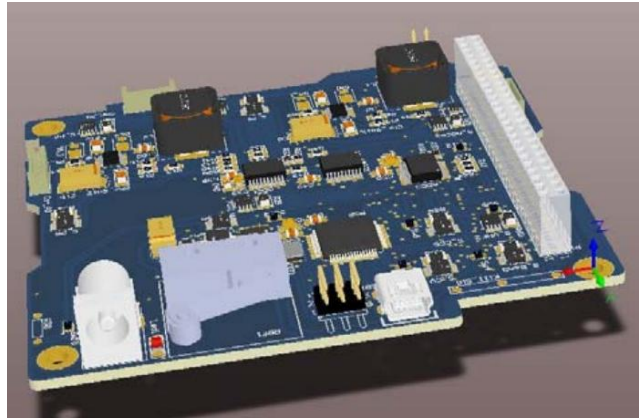


Figura 4.6 Patrón de radiación de la antena de banda S

## 4.8 Subsistema de potencia

El subsistema de potencia es el encargado de alimentar todos los circuitos del nanosatélite, está formado por dos tarjetas PCB, la primer tarjeta contiene los circuitos de carga de baterías y de calefacción para asegurar que la temperatura de las baterías se mantenga en el rango adecuado. La segunda tarjeta contiene circuitos de control y genera los voltajes de alimentación para los demás subsistemas del nanosatélite; también cuenta con circuitos protectores contra efecto “Latch-up”, circuito encargado de liberar las antenas UHF-VHF, y el “Kill Switch” encargado de encender el nanosatélite al liberarse en el espacio [3]. Cuando el subsistema de potencia recibe la orden de computadora de vuelo este activa el subsistema de comunicaciones en banda S para que puedan transmitirse las imágenes satelitales.

En la figura 4.7 se muestra una tarjeta PCB del subsistema de potencia del nanosatélite universitario.



*Figura 4.7 Subsistema de potencia del nanosatélite universitario [21]*

#### **4.9 Cámara de percepción remota**

La carga útil del nanosatélite universitario será una cámara de percepción remota de mediana resolución (90 m de resolución por pixel a una altura de 300 km), cuenta con un objetivo de la marca Schneider modelo Xenoplan 1.9/35, el rodamiento focal está sellado y es muy robusto mecánicamente, la cámara es sensible al espectro visible y las imágenes que capta generarán un tamaño de archivo de 354 Kbytes. En la figura 4.9 se observa la imagen de la cámara de percepción remota a utilizar como carga útil, está montada sobre una placa de soporte junto con los circuitos de control de adquisición de datos y la memoria de almacenamiento de imágenes.



*Figura 4.8 Cámara de percepción remota*

# CAPÍTULO

# 5

## *Estación terrena*

### **5.1 Introducción**

La estación terrena es la encargada de controlar al satélite a través de telecomandos y recibir información de este, ya sea telemetría o algún otro tipo de información, para esto, la estación terrena debe estar equipada con hardware y software atendiendo a las especificaciones orbitales y de diseño del nanosatélite universitario, el cual cuenta con comunicaciones en las bandas VHF-UHF que funcionan tanto para el enlace ascendente como descendente respectivamente, sin embargo el ancho de banda que se puede utilizar no es suficiente para descargar datos a gran velocidad, por lo que se decidió agregar un enlace adicional en Banda S para la descarga de un gran volumen de datos.

Los elementos principales con los que debe de contar la estación terrena para las comunicaciones VHF-UHF son un par de antenas Yagi, rotores para elevación y azimut, un modem UHF-VHF y una computadora. Para la descarga por Banda S, el hardware se encuentra conformado por un modem en Banda S idéntico al instalado en la estructura del nanosatélite pero configurado en modo maestro, una computadora de escritorio o laptop y una antena parabólica para banda S altamente direccional.

La computadora de escritorio tiene instalado un software diseñado para interactuar con el nanosatélite, en nuestro caso dicho software tiene integrado un protocolo de comunicaciones para poder descargar imágenes satelitales.

En la figura 5.1 se muestra el diagrama de enlaces entre el nanosatélite universitario y la estación terrena, como puede observarse, las comunicaciones VHF-UHF utilizan las antenas Yagi, mientras que la comunicación por Banda S utiliza la antena parabólica altamente direccional. Aun cuando no se muestra en la figura, ambas antenas requieren un sistema de rotores con control automático para seguir al nanosatélite en su recorrido mientras es visible por la estación terrena.

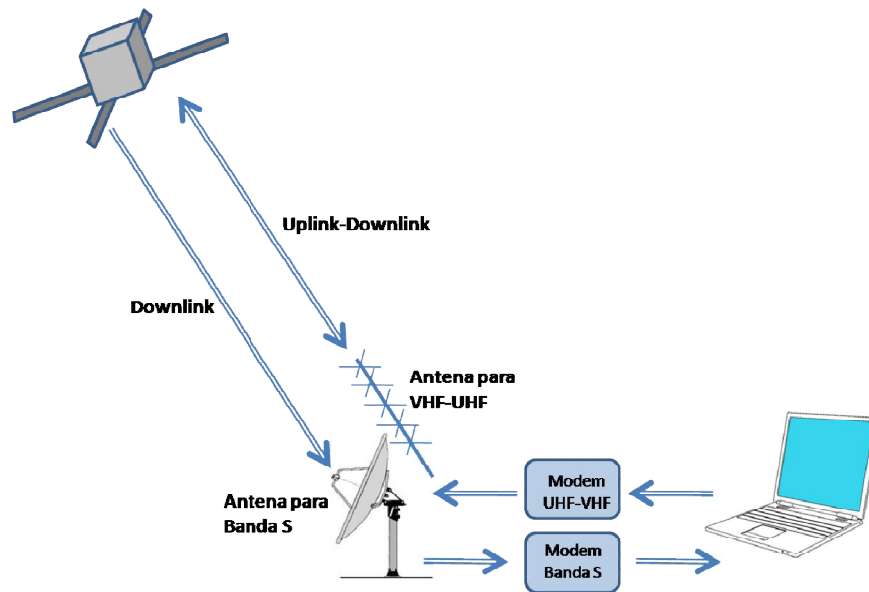


Figura 5.1 Comunicación del nanosatélite-estación terrena

El propósito de esta tesis es implementar el sistema en Banda S para la descarga de imágenes satelitales, por lo que en este capítulo se habla principalmente de los elementos que intervienen en el enlace por banda S.

## 5.2 Modem comercial para comunicaciones en Banda S

El modem para Banda S utilizado en la estación terrena es un n2420 de Microhard montado en una tarjeta de desarrollo nano motherboard, no es necesario realizar alguna modificación en hardware, puesto que, como se explicó en el capítulo 4, el modem n2420 se puede conectar directamente a la antena parabólica y la nano motherboard cuenta con un puerto serial RS232 que se conecta a una computadora personal.

Los modem n2420 pueden ser configurados para operar ya sea como maestro, esclavo o repetidor, de acuerdo a las diferentes topologías que se pueden configurar, están pueden ser punto a punto, punto a multipunto.

El modem n2420 se configura por medio de los comandos AT, asignando a los registros S el valor que se muestra en la Tabla 5.1, los cuales permiten adecuar los diferentes parámetros de operación del modem a las características del enlace.



**Tabla 5.1** *Parámetros AT configurados en el modem receptor o modem Maestro n2420*

<b>Registro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
S101=0	Modo de operación	Modo maestro
S102=7	Velocidad de transmisión de la interfaz serial	57600 bps
S103=2	Tasa de transmisión inalámbrica	172800 bps
S104=1234567890	Dirección de red	1234567890
S108=30	Potencia de transmisión	30 dBm
S109=9	Tiempo de salto de frecuencias	20 ms
S110=1	Formato de los datos en la interfaz RS232	8N1
S112=255	Tamaño máximo del paquete	250 bytes
S113=5	Numero de retransmisión de datos	5
S140=2	Dirección de destino	2
S142=0	Modo de transmisión serial	Utilizando la interfaz RS232

### 5.3 Antena parabólica Banda S

La estación terrena cuenta con una antena parabólica como la mostrada en la figura 5.2, está diseñada para operar en banda S, según las hojas de especificaciones esta antena tiene una ganancia de 30 dBi la cual fue comprobada experimentalmente en múltiples radioenlaces. El ancho de haz es de 3°.



*Figura 5.2* Antena parabólica para banda S utilizada realizar pruebas

## 5.4 Rotores de antena controlados por computadora

En el caso de un nanosatélite en órbita LEO, este se mueve a gran velocidad, por lo que es necesario que la antena parabólica apunte al nanosatélite, es necesario ajustar dos ángulos, el azimut y elevación, ángulos  $\beta$  y  $\theta$  respectivamente según se muestra en la figura 5.3

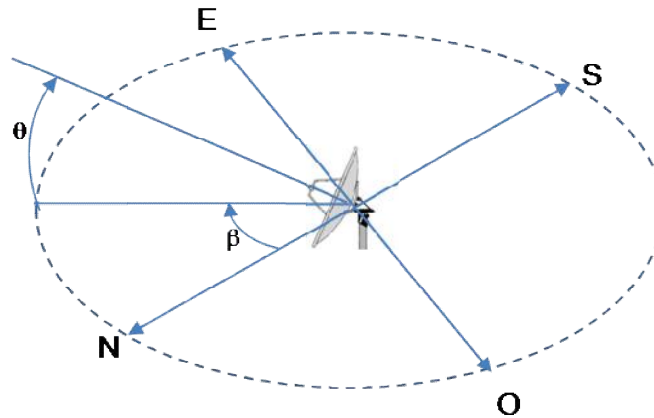


Figura 5.3 Ángulos de movimiento de antena parabólica para banda S

El ángulo de elevación se forma entre la horizontal y la línea que señala la dirección de máxima ganancia de la antena, el ángulo de azimut se mide en el sentido de las manecillas del reloj a partir de la línea imaginaria que une la antena con el norte geográfico y la proyección de la línea de máxima ganancia sobre el plano de tierra.

Para mantener la comunicación con un nanosatélite en órbita LEO es fundamental contar con rotores controlados de forma automática, existen en el mercado una gran variedad de rotores, como por ejemplo los de la empresa YAESU, en la tabla comparativa se muestran las características de rotores en azimut tipo torreta, los cuales pueden ser adaptados para uso en televisión, radio aficionado, militar o seguimiento de satélites.

El rotor que se ha seleccionado para orientar las antenas en elevación y azimut es de la marca YAESU modelo G-5500, el cual está diseñado para soportar las más adversas condiciones climatológicas, sus especificaciones se mencionan en la tabla 5.2, está fabricado en aleación de aluminio y tienen lubricación que puede durar muchos años sin requerir mantenimiento.

Tabla 5.2 Características principales del rotor YAESU G-5500 [25]

Característica	G-5500
Superficie al viento	1 m <sup>2</sup>
Torque de rotación en elevación	14 Kg-m
Torque de rotación en azimut	6 Kg-m
Máxima carga vertical	200 Kg
Precisión en el apuntamiento	±4%
Tiempo de rotación en elevación - giro de 180°	67 seg.
Tiempo de rotación en azimut - giro de 360°	58 seg.
Requerimientos de alimentación	110 VAC
Peso de los rotores	9 Kg
Peso del controlador	3 Kg
Precio	450 USD

Los rotores cuentan con una caja de control que recibe las señales generadas por el sistema de seguimiento y este responde posicionando la antena de manera que apunta al satélite que se desea. En la figura 5.4 se muestra el rotor con su respectiva caja de control.



Figura 5.4. Rotor y controlador YAESU G-5500 [26]

# CAPÍTULO

# 6

## *Pruebas y Adaptaciones al Sistema de comunicaciones en Banda S*

### **6.1 Introducción**

En este capítulo se describe la configuración realizada al modem n2420, las pruebas de transmisión a diferentes distancias y las modificaciones realizadas al hardware de la nano motherboard para poder energizarla (con el subsistema de potencia del nanosatélite) y pueda tener comunicación con la computadora de vuelo.

Las pruebas realizadas al modem son con la finalidad de:

- Analizar el comportamiento del modem utilizando diferentes perfiles de configuración (cambiando valores de los registros S).
- Observar el comportamiento del modem para diferentes canales de comunicación.
- Validar la compatibilidad eléctrica del subsistema en banda S con los demás subsistemas con los que interactúa.

Se inicia explicando el software utilizado durante las pruebas.

### **6.2 Software para la realización de pruebas**

Existen en internet muchos programas de uso libre (open source) que realizan la función de emulación de terminal, los cuales fueron de mucha utilidad para configurar el modem y para la realización de pruebas de transmisión. Varios de esos programas incluyen protocolos de comunicaciones que nos facilitan la transmisión de archivos, así mismo, fue de mucha utilidad la funcionalidad de algunos programas de visualizar los caracteres transmitidos en diferentes formatos

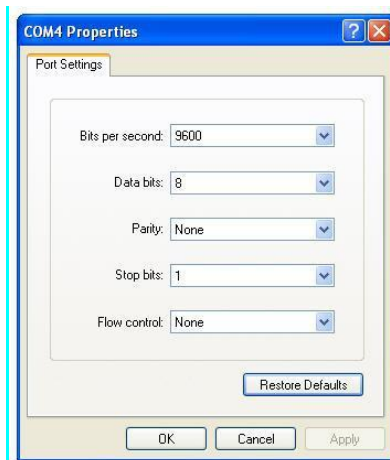
como ASCII, hexadecimal o binario. A continuación se describirá más a detalle el software utilizado para las pruebas.

### 6.2.1 Hyperterminal

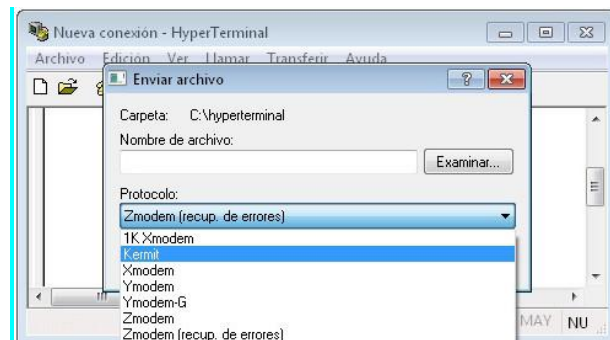
Hyperterminal es un software diseñado por la compañía Hilgraeve, el cual se instalaba por default en sistemas operativos Windows XP, actualmente no se instala de manera predeterminada en sistemas Windows 7 o Windows 8, pero es posible descargarlo de manera gratuita.

Este software es un emulador de terminal, en el cual entre otras funcionalidades, permite conectarnos con otro equipo o sistema electrónico por medio del puerto serie (RS 232) y mandar o recibir caracteres, según configuramos la conexión, así mismo este software tiene integrados los protocolos de transferencia de archivos xmodem, ymodem, zmodem y kermit los cuales utilizaremos de forma inicial para realizar pruebas con los módems banda S.

En la figura 6.1a aparecen las opciones a configurar para una conexión por puerto serie con hyperterminal y en la figura 6.1b aparecen los diferentes protocolos de transferencia de archivos que implementa dicho software.



a)



b)

Figura 6.1 Hyperterminal, a) Configuración de puerto serie, b) Protocolos de transferencia de archivos implementados

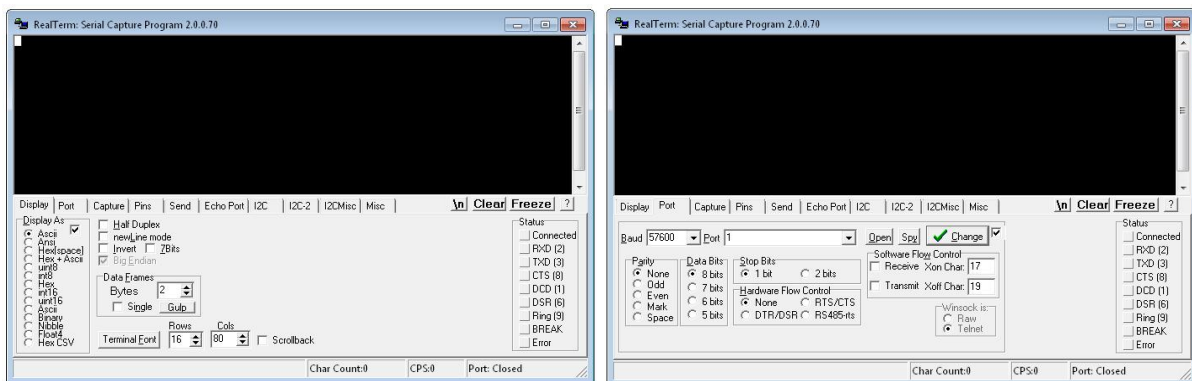
### 6.2.2 Realterm

Realterm es un software de terminal, especialmente diseñado para capturar, controlar y depurar flujos de datos, es de uso libre, tiene mayor funcionalidad que hyperterminal, lo cual nos será muy útil a la hora de realizar pruebas con los

módems y validar los protocolos de transferencia de archivos o cualquier trama de control o de datos que se transmita, ya que permite visualizar los datos en formato hexadecimal.

Algunas de las funcionalidades con que cuenta este software se enumeran a continuación [27]:

- Podemos visualizar los datos en formato ascii, binario, hexadecimal, 8 bit, 16 bit, con signo o sin él.
- Muestra la transmisión y le recepción con colores distintos.
- Captura y guarda en archivos.
- Permite ver y controlar las líneas (CTS, RTS, DCD etc).



a)

b)

Figura 6.2 Realterm, software para visualizar paquetes de datos en diferentes formatos a) formato en el que se visualizarán los datos, b) configuración del puerto

### 6.3 Hardware para la realización de pruebas

Para la realización de pruebas de comunicaciones en banda S fue necesario contar con el sistema de comunicaciones en banda S seleccionado, antenas diseñadas para operar en banda S y equipo de laboratorio con la capacidad para realizar mediciones en dicha banda de frecuencia, las pruebas iniciales se realizaron con hardware de emulación, ya que no fue posible contar con la cámara de percepción remota y la computadora de vuelo, al final de las pruebas ya se pudo contar con el diseño final de la computadora de vuelo y se realizó el envío de imágenes satelitales desde la misma.

A lo largo de todas las pruebas se utilizó el hardware y equipo de laboratorio enlistado en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Hardware y equipo utilizado para pruebas

Descripción	Cantidad
Modem n2420	2
Antena parabólica Banda S	1
Antena rómbica de cruz	2
Dummy (emulador de cámara)	1
Tarjeta de desarrollo MSP-EXP430F5529LP LaunchPad	1
Computadora de vuelo (PCB basada en Microcontrolador TMS570LS1227 )	1
Laptop	2
Analizador de espectros	2

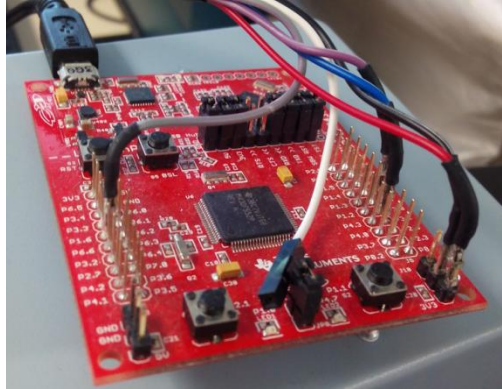
### 6.3.1 Sistema de comunicaciones en Banda S

Para la realización de estas pruebas se adquirieron dos kit completos del modem n2420 (modelo n2420F-EXP). Cada kit incluye un modem n2420, una nano motherboard, una antena monopolo de 3 dBi y una fuente de alimentación. Con los cuales fue posible establecer un enlace de comunicaciones de corto alcance.

### 6.3.2 Tarjeta emuladora de computadora de vuelo

En la figura 6.3 se presenta la tarjeta emuladora de computadora de vuelo (Tarjeta de desarrollo MSP-EXP430F5529LP LaunchPad) que se ha utilizado para controlar el radio de banda S, en esta tarjeta de Texas Instruments se ha cargado el software que gestiona la transferencia de datos de la cámara hacia el radio, la comunicación con el modem n2420 se realiza mediante el puerto serial y con la cámara (Dummy emulador) por el puerto I2C, a grandes rasgos el procedimiento de comunicación es el siguiente:

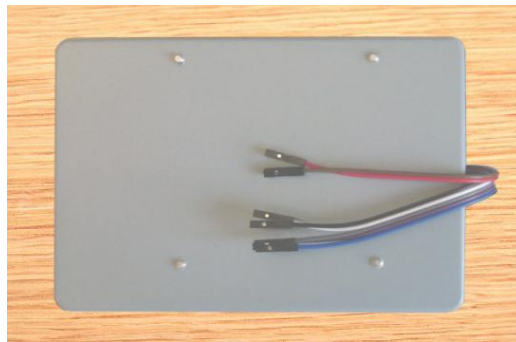
- 1.- Inicializa puertos de comunicación (I2C y Serial), buffers para recibir comandos y paquetes de datos
- 2.- Espera recibir comando por puerto Serial, una vez recibido evalúa la integridad del comando utilizando el CRC y reenvía el comando al Dummy
- 3.- Si el comando es para solicitar un paquete de imagen al Dummy, espera dicho paquete y lo almacena en el buffer correspondiente.
- 4.- Envía el paquete de imagen almacenado al modem n2420 por el puerto serial.



*Figura 6.3 Tarjeta emuladora de computadora de vuelo*

### 6.3.3 Dummy

Para realizar la adquisición de datos de la cámara hacia la computadora de vuelo, se ha desarrollado un dispositivo Dummy, con el fin de realizar pruebas durante el desarrollo del proyecto, dicho dispositivo opera emulando a la cámara satelital, recibe comandos y realiza las operaciones indicadas, de esta forma tenemos una caja negra, en la cual hay almacenadas imágenes satelitales; esta caja negra cuenta con un puerto de comunicaciones que funciona de acuerdo al estándar I2C por medio del cual nos comunicaremos.



*Figura 6.4 Dummy que emula el funcionamiento de la cámara.*

## 6.4 Configuración del modem para pruebas de enlace con hyperterminal

Para poder configurar los modem y adaptarlos a nuestras necesidades, se procedió a modificar los registros S. Para nuestro caso tenemos un enlace punto a punto, el modem de estación terrena se configuró en modo maestro y el modem satelital en modo esclavo como se resume en la tabla 6.2.



**Tabla 6.2 Configuración de los registros del modem maestro y esclavo**

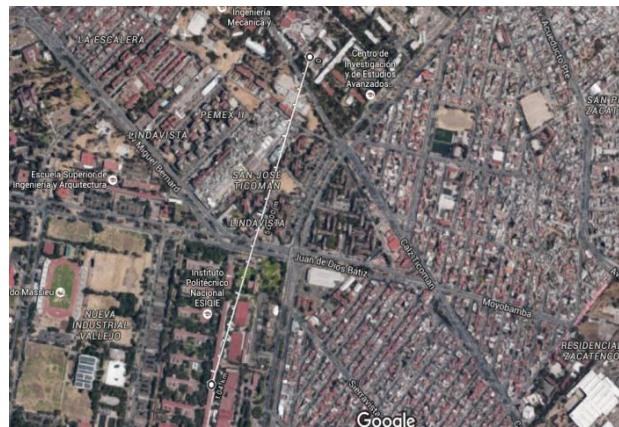
Parámetro	Registro modificado	Valor asignado Modem Maestro	Valor asignado Modem Esclavo
Modo de operación	S101	Modo Maestro	Modo Esclavo
Velocidad del enlace	S103	115200 bps	115200 bps
Tiempo de salto de frecuencias	S109	20 ms	20 ms
Tamaño máximo del paquete	S112	132 bytes	132 bytes
Dirección de destino	S140	2	1
Modo de transmisión serial	S142	RS232	RS232
Velocidad de transmisión serial	S102	57600 bps	57600 bps
Potencia de transmisión	S108	30 dBm	30 dBm
Formato de los datos	S110	8N1	8N1
Número de retransmisiones	S113	5	5
Tipo de red	S133	Punto a punto	Punto a punto

### 6.4.1 Pruebas de enlace a 1 km

Primeramente se realizó una prueba de enlace a una distancia de 1 km, para esto se ha colocado la antena transmisora tipo rómbica de cruz a 25 metros de altura como en la torre que se muestra en la figura 6.5a), conectada mediante un cable coaxial de más de 30 m de longitud, en el otro extremo del enlace se ha colocado otra antena de las mismas características.



a)



b)

*Figura 6.5 a) Antena rómbica de cruz montada en torre de 20 metros de altura utilizada para pruebas de comunicación entre dos módems n2420 ubicados a 1 km de distancia b) Enlace realizado entre los edificios de ESIME-Zacatenco y ESIME-Ticomán, distancia de enlace de 1.04 km en línea de vista.*

El enlace se ha efectuado transmitiendo una imagen de 362 kb, con un tiempo de transmisión de 1 min 50 segundos después de varios intentos fallidos, normalmente el tiempo de transmisión es inferior a 1 min, sin embargo aquí ha durado más la descarga ya que existe mucho ruido de piso en la zona altamente urbanizada, esto provoca una alta interferencia ya que el canal de comunicaciones está altamente plagado de señales espurias, como son las de los acces point y otros equipos.

### 6.4.2 Pruebas de enlace a 10 km

Para la prueba de enlace a 10.6 km, al igual que en el enlace a 1.04 km se utilizó la antena transmisora tipo rómbica de cruz a 25 metros de altura montada en la torre de comunicaciones y conectada mediante un cable coaxial, en el otro extremo del enlace se utilizó una antena parabólica.

En este enlace se ha logrado recibir texto muy corto, pero no ha sido posible la transmisión de todo un paquete de datos como lo es una imagen, a pesar de haber utilizado en uno de los extremos del enlace una antena parabólica, la cual tienen una ganancia de 30 dB, esto se ha debido al ruido de piso existente y que es captado por ambas antenas, ya que la elevación de apuntamiento es prácticamente  $0^\circ$ .

En la figura 6.6 aparece una vista aérea del enlace realizado.

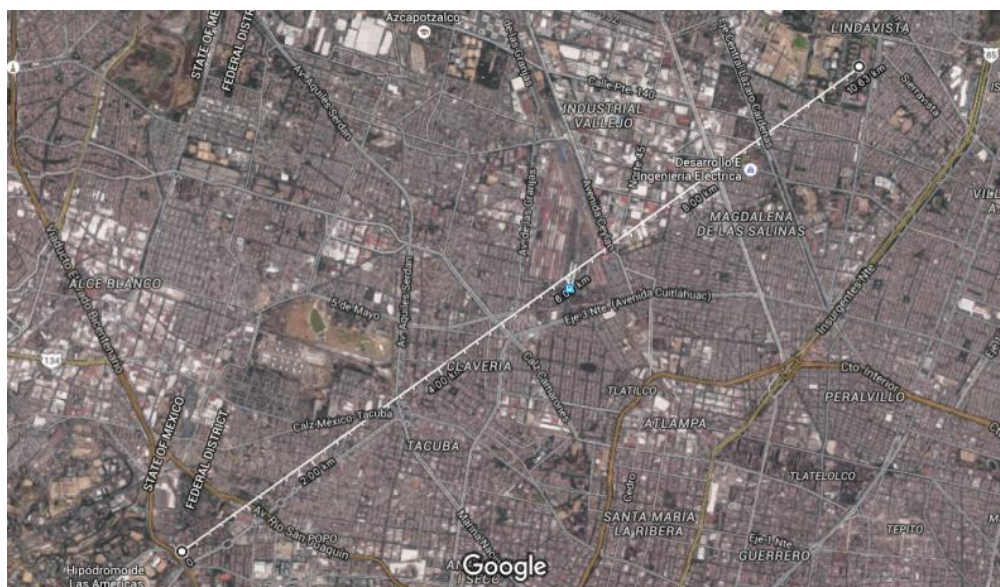
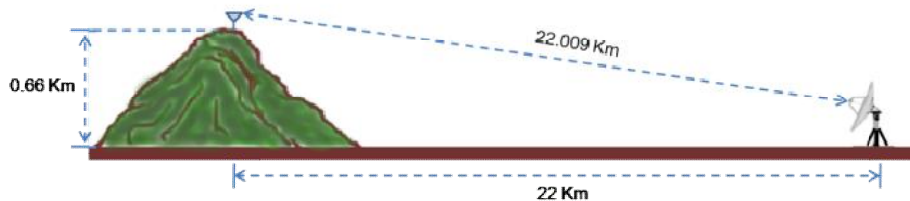


Figura 6.6 Enlace realizado entre el edificio de ESIME-Zacatenco y la base área de transmisiones, distancia de enlace de 10.6 km en línea de vista

### 6.4.3 Pruebas de enlace a 22 Km

En estas pruebas se realizó un enlace desde la montaña “pico tres padres” con una altura de 3000 metros sobre el nivel del mar hasta la base aérea Santa Lucia, ubicada en Tecamac Estado de México ubicado a 2340 metros sobre el nivel del mar, este enlace permite realizar comunicaciones mas netas ya que no hay demasiada interferencia debida a dispositivos que también operan en banda S, como pueden ser equipos con tecnología WiFi u Hornos de Microondas principalmente.

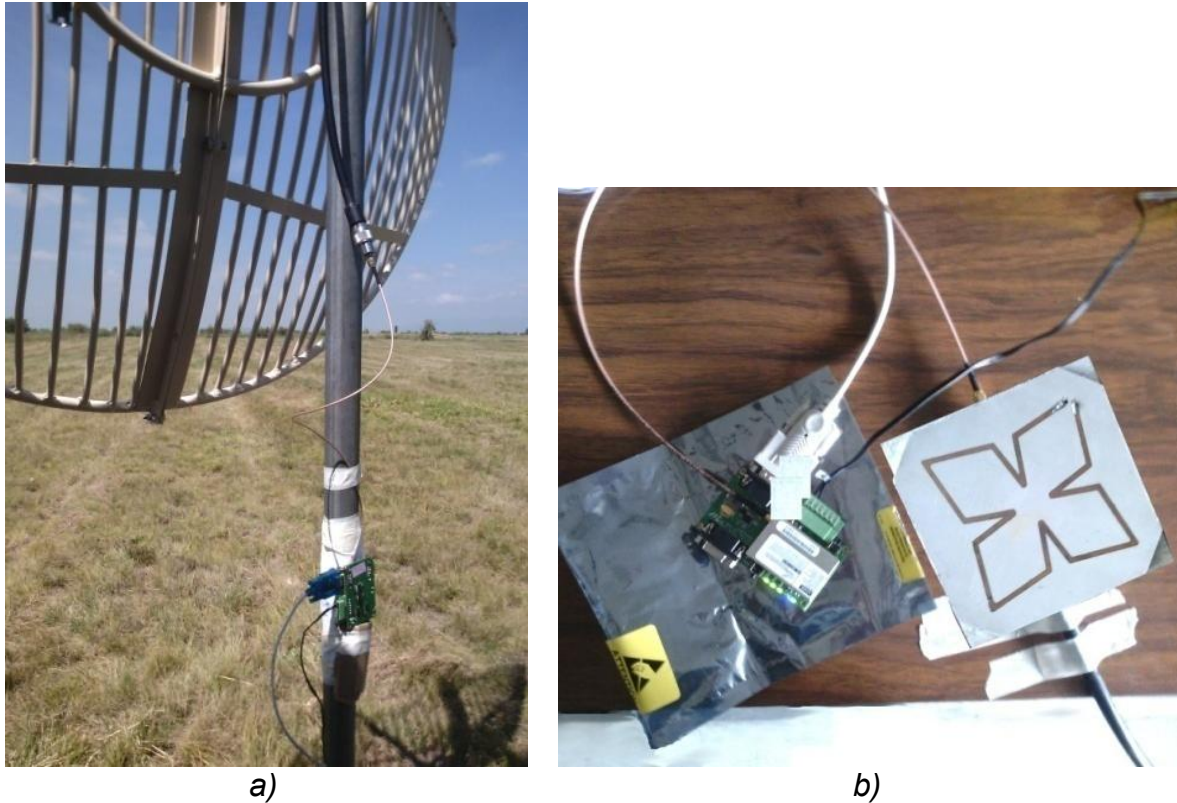
Restando las alturas sobre el nivel del mar, la altura del cerro “pico tres padres” sobre la horizontal donde se colocó la antena parabólica (como se muestra en la figura 6.7) es de 660 metros, aplicando el teorema de Pitágoras, la distancia entre las antenas es resultante es de 22.0 km con un ángulo de elevación de  $1.7^\circ$ .



*Figura 6.7 Prueba de enlace en una distancia de 22 Km entre cerro pico tres padres y base aérea Santa Lucia.*

En la figura se aprecia la distancia del enlace, en un extremo del enlace se ha colocado la antena rómbica de cruz que irá instalada en el nano satélite con una ganancia de 4 dB, en el otro extremo se ha colocado la antena parabólica que en el proyecto estará instalada en la estación terrena dándole seguimiento al satélite.

En la figura 6.8a) se ve la antena parabólica receptora con el radio de banda S conectado y en la figura 6.8b) se observa la antena rómbica de cruz y el radio transmisor utilizados para los diferentes enlaces.



*Figura 6.8 a) Antena parabólica con el radio receptor de banda S conectado b) Antena rómbica de cruz con el radio transmisor de banda S conectado*

Para conocer la potencia recibida, se ha utilizado un analizador de espectros con la frecuencia central a 2.4 GHz, este equipo se ha ajustado para reducir al máximo el ruido de piso del propio equipo, esto se puede realizar fácilmente activando el amplificador de bajo ruido que tiene integrado en el puerto de entrada. Como se puede observar en la figura 6.9, las mediciones han sido almacenadas y procesadas previamente para determinar la ganancia completa del sistema y poder estimar si en esta configuración va a ser posible recibir datos a una altura promedio de 800 km en que estará volando el satélite. En el equipo de medición se han captado portadoras del orden de -75 dBm en promedio.



*Figura 6.9 Analizador de espectros conectado a la antena parabólica ubicada en Tecamac, con la finalidad de medir la potencia de recepción*

#### **6.4.3.1 Calculo de potencia recibida a 22 Km.**

Para realizar el cálculo de enlace y tener una expectativa de la potencia que se recibiría estando el satélite a una altura promedio de 800km se ha procedido a utilizar los datos presentados en la tabla 6.3

*Tabla 6.3 Datos del enlace realizado entre Pico tres padres y Base Aérea Santa Lucia*

<b>DATOS DEL ENLACE</b>	
<b>Potencia de salida</b>	1 W
<b>Distancia</b>	22.0 Km
<b>Ganancia Antena Rómbica de cruz</b>	4 dBi
<b>Ganancia Antena Parabólica</b>	30 dBi
<b>Perdidas en transmisor y Antena</b>	1dB
<b>Perdidas en el receptor</b>	0 dB
<b>Sensibilidad del receptor</b>	-107 dBm
<b>Frecuencia</b>	2400 MHz

Se ha utilizado la siguiente ecuación para calcular la potencia recibida

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - L_{FS} - L_M + G_{RX} - L_{RX} \quad (6.1)$$

Donde:

$P_{TX}$  es la potencia de salida.

$G_{TX}$  es la ganancia de la antena en el transmisor (antena en RF60 banda S).

$L_{TX}$  es la pérdida entre el transmisor y la antena (banda S)

$L_{FS}$  es la pérdida en el espacio libre [dB]

$L_M$  son las pérdidas diversas por interferencia atmosférica (suponemos estas interferencias igual a cero)

$G_{RX}$  es la ganancia de la antena en el receptor en dBi (Con antena parabólica de banda S)

$L_{RX}$  es la pérdida en el receptor (En este caso consideraremos que no hay pérdidas)

Las pérdidas en el espacio libre, las calculamos con la ecuación siguiente:

$$L_{FS} = 20 \log \left[ 4\pi \frac{d}{\lambda} \right] \quad (6.2)$$

Puesto que  $\lambda = \frac{v}{f}$ , sustituyendo en (6.2)

$$L_{FS} = 20 \log \left[ 4\pi \frac{df}{v} \right]$$

$$L_{FS} = 20 \log \left[ 4\pi \frac{(22009\text{m})(2400 \times 10^6 \text{Hz})}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} \right]$$

$$L_{FS} = 20 \log[2212586.007]$$

$$L_{FS} = 126.89 \text{ dB}$$

Sustituyendo valores en (6.1)

$$P_{RX} = 30 \text{ dBm} + 4 \text{ dBi} - 1 \text{ dB} - 126.89 \text{ dB} + 30 \text{ dBi} = -63.89 \text{ dBm}$$

La sensibilidad del receptor determina la distancia máxima en la que todavía es posible recibir señal. Cálculos previos realizado en la sección 2.5 muestran que a una distancia de 815 km se recibe una potencia teórica de -96 dBm, es decir que

el ruido del receptor esta 11 dB por debajo de la señal recibida y en teoría se tendría una recepción aceptable.

Por otra parte, la potencia calculada es ligeramente superior a la que se ha medido en el analizador, esto es normal, ya que el analizador realiza una adquisición en todo el ancho de banda de operación en un tiempo 1 segundo, mientras que la transmisión se realiza en saltos con intervalos de 150 milisegundos de duración. Y el barrido es poco probable que coincida con la frecuencia de la portadora. Otro factor que interviene en la medición es la orientación de la parabólica, ya que el ancho del haz principal es de  $5.4^\circ$  y con un menoscupible movimiento de la antena, la potencia recibida cambiaba en varios dB.

En la figura 6.10 se presenta la medición realizada con el analizador de espectros, se observan en la pantalla de medición el ancho de banda de medición que va desde 2.39 a 2.49 GHz con potencias recibidas cercanas a -75 dBm.

#### **6.4.3.2 Mediciones realizadas**

El modem n2420 implementa la tecnología de espectro expandido por salto de frecuencia (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), utiliza 202 canales y una separación entre canales de 400 kHz, siendo el canal de menor frecuencia el ubicado en 2.4016 GHz, de tal manera que podemos calcular la frecuencia del *n-esimo* canal con la siguiente fórmula [14]:

$$F = 2401.6 + [(n-1) \times 0.400] \text{ MHz} \quad (6.3)$$

Aplicando esta fórmula, el canal 202 está ubicado en la frecuencia de:

$$F = 2401.6 + [(202-1) \times 0.400] \text{ MHz} = 2.482 \text{ GHz}$$

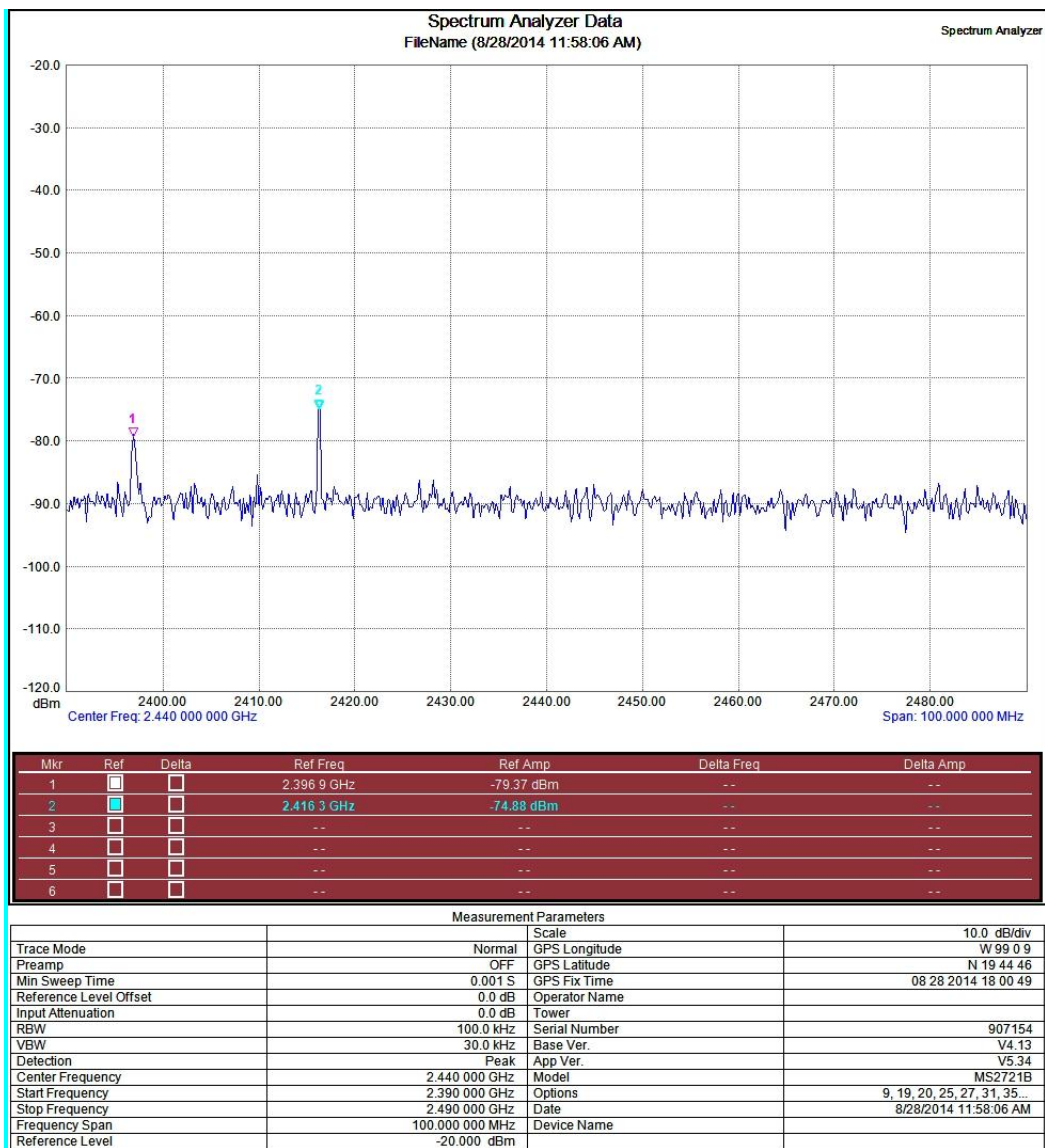


Figura 6.10 Potencia recibida en base aérea, con antena parabólica.

En la figura 6.10 aparece el espectro de frecuencia captado por el analizador de espectros conectado a la antena parabólica, en dicha figura aparecen dos portadoras etiquetadas como 1 y 2, puesto que la portadora 1 (2.3969 GHz) está ubicada fuera del rango de frecuencias en que trabaja el modem n2420 deducimos que es una portadora ajena que es captada debido a que en el cerro “pico tres padres” hay instalado diverso equipo de comunicaciones. Para la portadora 2 (2.4163 GHz), despejamos n de la formula (6.3) y sustituimos.

$$n = [(F-2401.6)/0.400]+1$$

$$n = [(2416.3 - 2401.6)/0.400]+1 = 37.75 \approx 38$$



Por lo que la portadora etiquetada como 2 en la figura 6.10 corresponde al canal número 38 del modem n2420.

En la figura 6.11 tenemos el espectro captado en el cerro “pico tres padres”, utilizando un analizador de espectros conectado a la antena “Rómbica de cruz”. En dicha figura podemos apreciar 4 portadoras, para las cuales aplicamos la fórmula para encontrar el número de canal de transmisión, los resultados se muestran en la tabla 6.3.

*Tabla 6.4 Portadoras detectadas por el analizador de espectros*

No. de Portadora	Frecuencia (GHz)	Resultado de calculo	No. de Canal
1	2.4355	85.75	86
2	2.4386	93.5	93 ó 94
3	2.4409	99.25	99
4	2.4674	165.5	165 ó 166

No se obtuvieron valores exactos al calcular el número de canal, esto puede deberse a error de calibración del equipo utilizado y/o el margen de error de los algoritmos utilizados por el analizador de espectros para calcular la frecuencia, sin embargo los resultados prácticos son de gran utilidad para verificar el correcto funcionamiento del modem n2420.

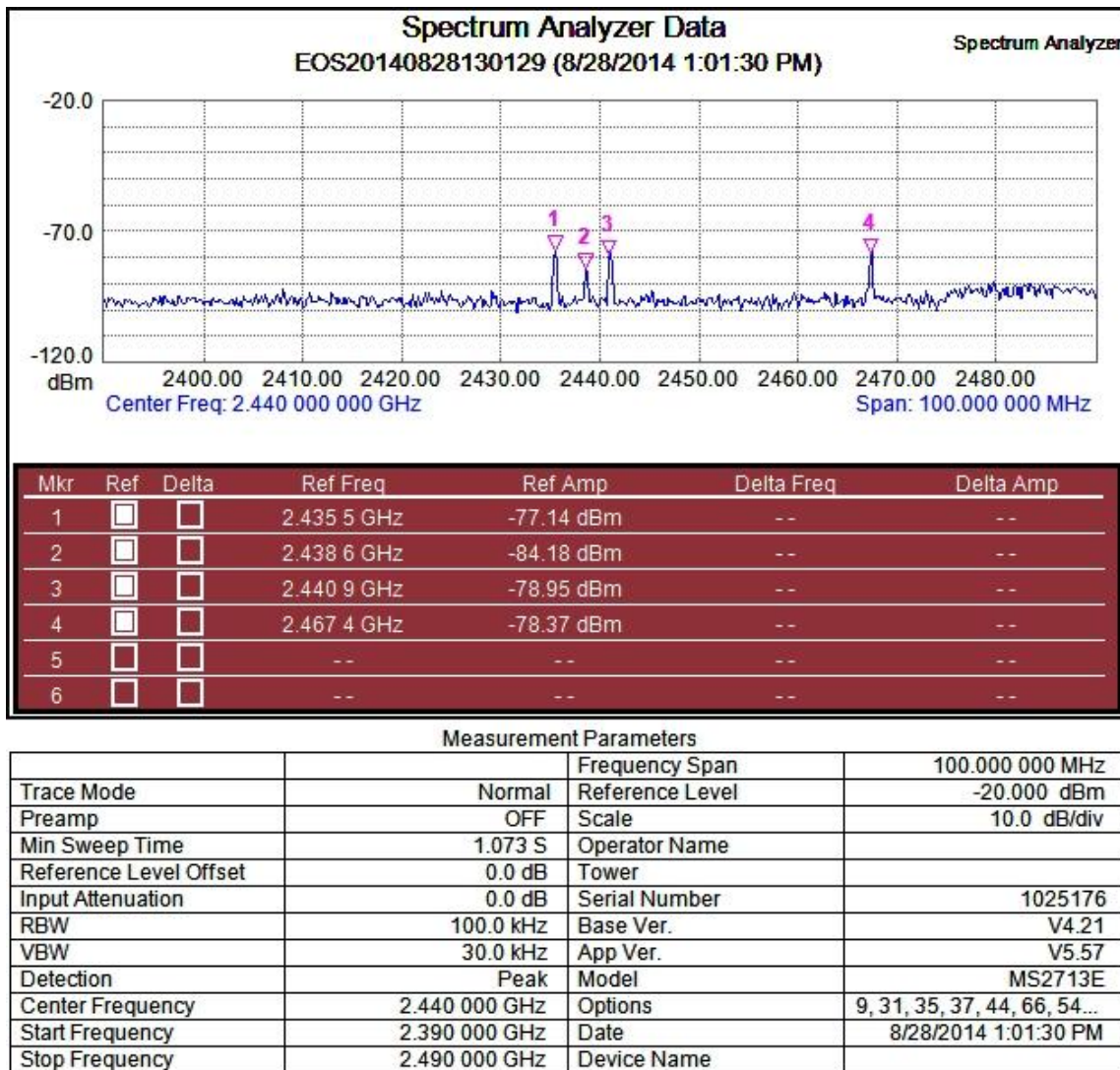


Figura 6.11 Potencia recibida en el cerro “pico tres padres”, con antena rómbica de cruz.

Las pruebas han permitido verificar la calidad de la transmisión en función de estar modificando diferentes parámetros en el radio, se ha jugado con las variables de potencia, código de corrección de errores (FEC), duración de los saltos de frecuencia, tamaño de paquetes transmitido, velocidades del enlace y velocidades del serial, esto valida el correcto funcionamiento tanto del subsistema **banda S-antena rómbica de cruz** que irán montados en el nanosatélite como del subsistema **banda S-antena parabólica**.

Para terminar el presente capítulo se presentan las modificaciones realizadas al hardware de la nano motherboard, necesarias para poder interconectar el

subsistema en banda S con los demás subsistemas, y también las pruebas realizadas utilizando **Banda S-Computadora de vuelo**.

## 6.5 Modificaciones al Hardware de la nano motherboard

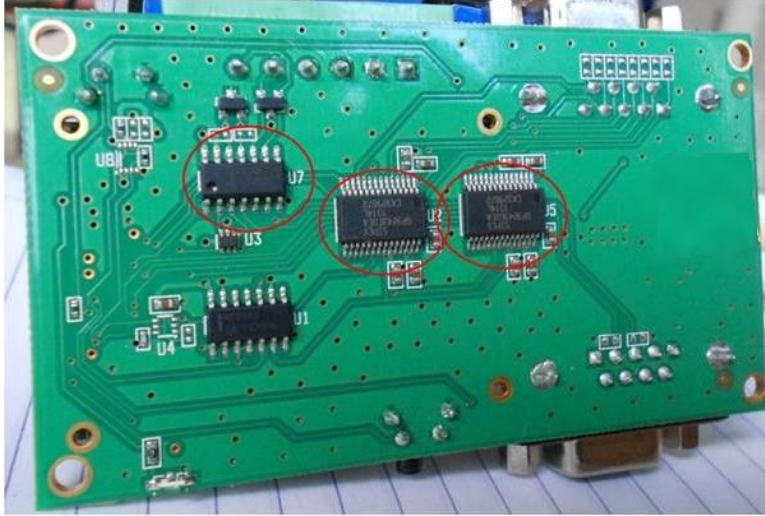
Para conectar **Banda S-Antena Rómbica de cruz** se utiliza un cable MMCX plug a MMCX Jack, el conector MMCX plug irá conectado al conector MMCX Jack integrado al n2420 y el conector MMCX Jack al conector MMCX plug integrado a la antena Rómbica de cruz. La conexión **Banda S-Antena parabólica** se realiza con un cable MMCX plug a conector tipo N Jack, análogamente, el conector MMCX se conecta al n2420 y el conector tipo N se conecta a la antena parabólica.

Para poder interconectar la nano motherboard con los subsistemas de computadora de vuelo y potencia es necesario realizar algunas modificaciones al hardware de la nano motherboard debido a que como se describió en el capítulo anterior, la nano motherboard cuenta con dos conectores RS232 que son incompatibles con la lógica de 3.3 Volts que maneja la computadora de vuelo, una opción es agregar los conectores y circuitos electrónicos necesarios para poder adaptar los voltajes entre ambos subsistemas, sin embargo hay varias ventajas por las cuales la mejor opción es modificar el hardware de la nano motherboard como son:

- Ahorrar espacio
- Ahorrar energía
- Disminuir el peso del nanosatélite

La conexión directa de la computadora de vuelo a la nano motherboard es viable, ya que como se describió en el capítulo anterior, el n2420 maneja lógica de 3.3 Volts, por lo que es necesario desactivar la circuitería que adapta los voltajes entre la lógica de 3.3 Volts y los niveles manejados por el puerto RS232, así como los conectores RS232.

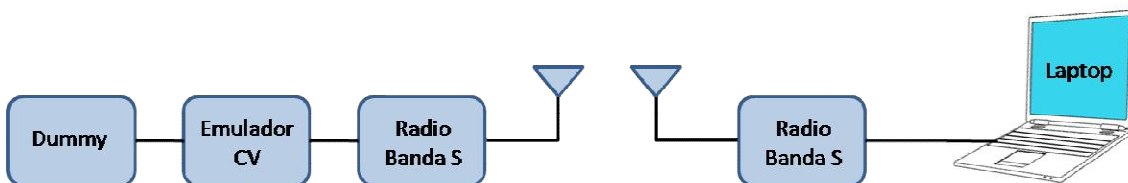
Para conectar Banda S al subsistema de potencia la mejor opción también es modificar el hardware, ya que de esa manera utilizamos de forma consistente la lógica de 3.3 Volts, ahorramos energía y peso al retirar el regulador de voltaje y el conector RS422/485.



*Figura 6.12 Modificaciones a la nano motherboard*

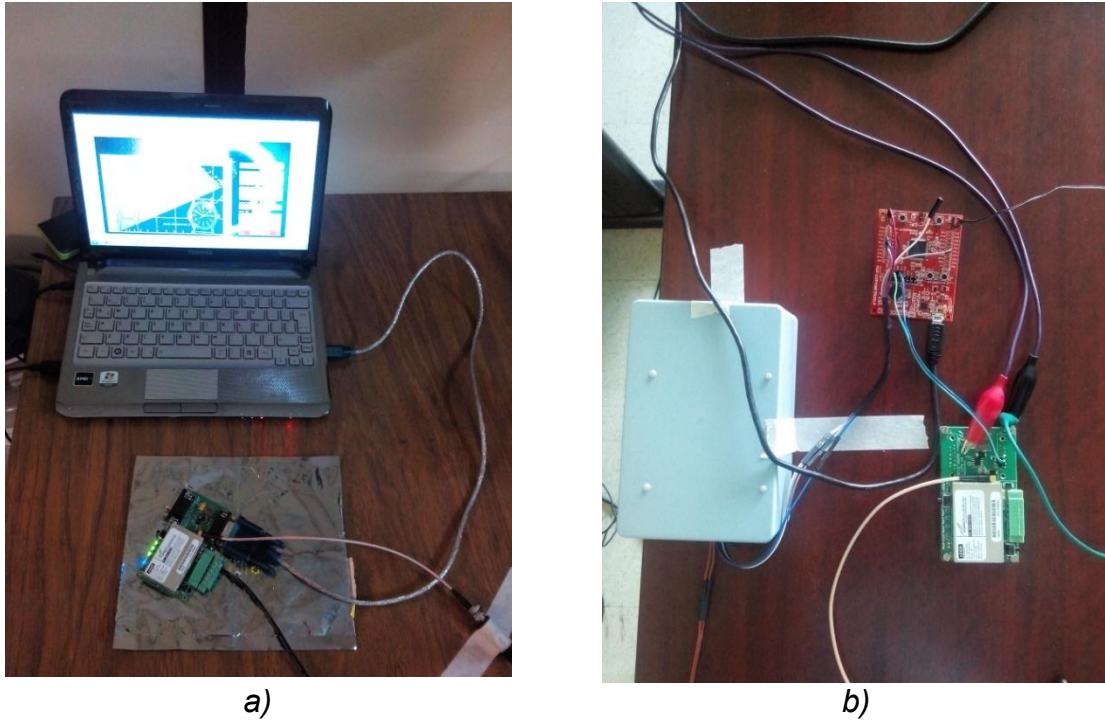
### 6.6 Pruebas con Dummy y tarjeta emuladora de computadora de vuelo

En estas pruebas se realizó la transmisión de una imagen de 362 KB por medio de los radios de banda S. Uno de los radios se conectó a una laptop en la cual se ejecuta el software de recepción de imágenes, el otro radio se conectó a la tarjeta que emula a la computadora de vuelo.



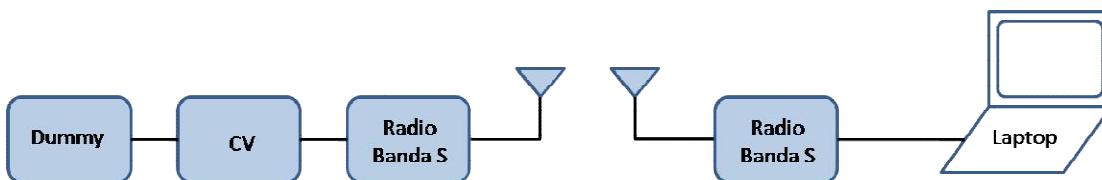
*Figura 6.13 Pruebas de envío de imagen con dummy emulando las funciones de la cámara y tarjeta MSP430 emulando a la computadora de vuelo*

En una primera prueba tuvimos problemas para recibir la imagen, ya que el radio en banda S transmite paquetes con un tamaño máximo de 255 Bytes y los paquetes enviados por el Dummy son de 264 Bytes (tamaño constante), esto ocasionaba que el software de recepción de imágenes interpretara mal los paquetes y todos resultarían erróneos. Se realizó una “pequeña” modificación al software de recepción de imágenes, con lo que se logró recibir los 1426 paquetes con cero errores de transmisión, en un tiempo de 7.2 minutos.



*Figura 6.14 Conexión de equipo para pruebas de transmisión de imagen a) Equipo y software para recepción de imagen b) Equipo para transmitir imagen.*

### 6.7 Pruebas con cámara de percepción remota y computadora de vuelo utilizando el software básico de operación



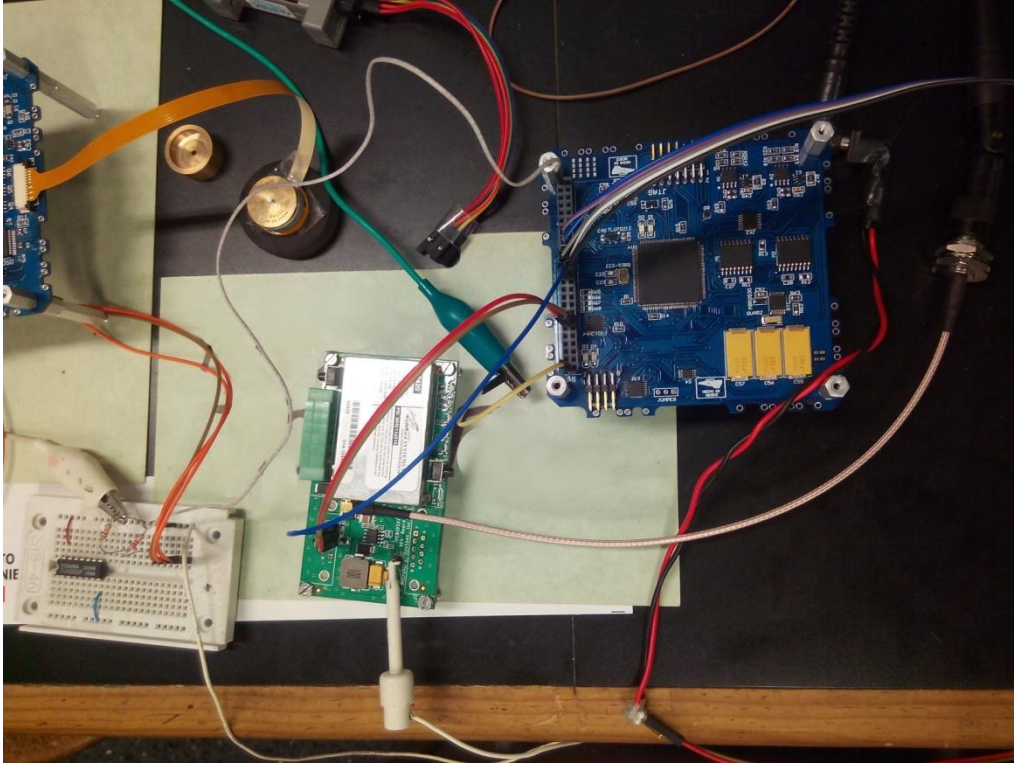
*Figura 6.15 Conexión de subsistemas para pruebas de transmisión de imágenes.*

Realizamos el envío de imagen de 362 KB por Banda S,  
utilizando para ello:

- Dummy
- Computadora de Vuelo
- 2 Radios Banda S

- PC de escritorio con software de estación terrena

Realizamos la conexión según se muestra en la figura 6.16, tardando la descarga de imagen un tiempo de 4 minutos.



*Figura 6.16 Pruebas Computadora de Vuelo - Banda S*

# CAPÍTULO

# 7

## *Software básico de operación para el envío de imágenes por Banda S*

### **7.1 Introducción**

Las imágenes tomadas por la cámara satelital se almacenan en una memoria interna de la computadora de vuelo, la finalidad es que puedan ser transmitidas a estación terrena utilizando Banda S como medio de descarga de alta velocidad, para realizar esta operación, el software de la computadora de vuelo y de estación terrena tienen que manejar el mismo protocolo de comunicaciones, a continuación analizaremos algunos protocolos utilizados para el envío de archivos y las características que debe tener el protocolo de comunicaciones que utilizaremos para la descarga de imágenes.

Particularmente se describirá el protocolo Kermit el cual es un protocolo muy robusto, adaptable y eficiente si se configura adecuadamente llegando incluso a superar a protocolos de streaming como Zmodem [28], siendo el protocolo Kermit el que se seleccionó para la descarga de imágenes tomadas por el nanosatélite universitario.

### **7.2 Protocolos para envío de imágenes**

Existen varios protocolos utilizados para el envío de imágenes, estos surgieron debido a la necesidad de transferir archivos entre computadoras, el medio de transmisión era principalmente cobre, uno de los protocolos más antiguos es el Xmodem, después surgieron otros como son el Ymodem, Zmodem y Kermit, también podemos diseñar nuestro propio protocolo, sin embargo, ponemos énfasis en protocolos que se convirtieron en estándar, los cuales están ampliamente documentados.

El protocolo Zmodem es un protocolo de streaming el cual solo puede operar en canales con niveles de error muy bajos y es muy ineficiente en canales con mediano o alto nivel de error [28]. En cambio Kermit es un protocolo conocido principalmente por atravesar casi cualquier canal de comunicaciones.

En este capítulo se analizan las características de los protocolos Xmodem y Kermit, el protocolo Xmodem se analiza debido a que es uno de los primeros protocolos que se diseñaron para transmitir archivos, el protocolo Kermit fue el que más se utilizó durante la fase de pruebas de transmisión de archivos a través de los modem n2420 con buenos resultados, ambos protocolos están implementados en la aplicación Hyperterminal y esto facilitó su uso.

### 7.2.1 Protocolo Xmodem

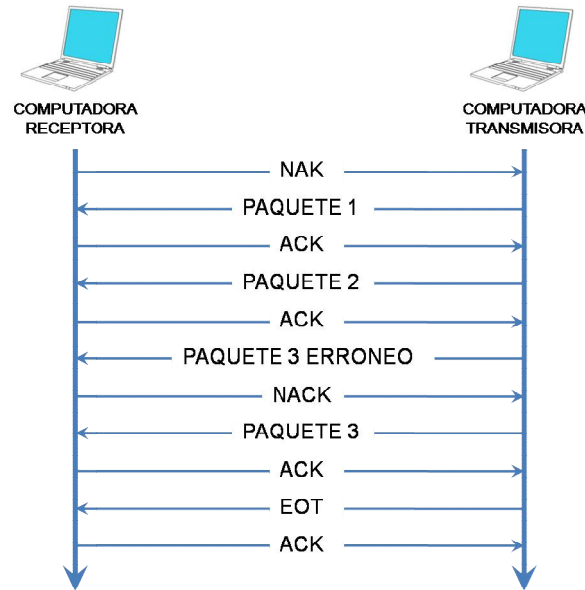
El protocolo para envío de archivos Xmodem fue inventado por Ward Christensen [29], y existen diferentes versiones que fueron surgiendo al introducir mejoras, este protocolo apareció justo en el momento en que las comunicaciones vía modem comenzaban a imponerse, unido a su facilidad de implementación hicieron que se popularizara ampliamente su uso, al grado de convertirse en un estándar. Para transmitir un archivo utilizando Xmodem, se divide en bloques de 128 Bytes, para formar un bloque Xmodem según aparece en la tabla 7.1, el cual está constituido por un encabezado SOH, un número de bloque, un complemento a uno del número de bloque, los 128 bytes de información y un byte de suma de comprobación.

*Tabla 7.1 Formato de los Bloques Xmodem [29]*

BYTE	CONTENIDO
0	Carácter SOH (Start Of Header)
1	Número de bloque.
2	Complemento a uno del número de bloque
3 al 130	128 bytes de datos
131	Sumas de comprobación.

La primer versión del protocolo Xmodem utiliza un byte de suma de comprobación, también hay una versión que sustituye el byte de suma de comprobación por dos bytes de CRC, aumentando el número total de bytes del paquete a 133. En la figura 7.1 se puede apreciar el esquemático del protocolo Xmodem.





*Figura 7.1. Envío recepción de archivo utilizando Xmodem [29]*

Una vez puesto en funcionamiento el protocolo Xmodem, el receptor del archivo enviará cada 10 segundos un carácter NAK o un carácter C (dependiendo de la versión de Xmodem que se utilizará, con suma de comprobación o CRC respectivamente), el transmisor espera dicho carácter para enviar el primer paquete de datos. El protocolo Xmodem es del tipo Stop-And-Wait por lo que el transmisor espera confirmación de recibido para cada paquete que envía, si recibe un NAK, entiende que hubo algún problema con el paquete y vuelve a enviarlo. Cuando el transmisor termina de enviar los paquetes envía un carácter EOT y espera un ACK como indicativo de final de transmisión.

Algunas de las desventajas de este protocolo son:

- Transmite solo los datos del archivo pero no el nombre de éste o algún otro dato como la fecha de creación.
- Si el tamaño del archivo no es múltiplo de 128 bytes, modifica su tamaño para poder hacerlo compatible para la transmisión.
- Fue diseñado para ser utilizado a bajas velocidades en un canal de transmisión con baja tasa de errores.

## 7.2.2 Protocolo Kermit

El protocolo Kermit fue desarrollado por Frank da Cruz y Bill Catching [29], en 1981. Entre sus ventajas están la de ser un protocolo muy robusto y adaptable, ya que podemos ajustar el tamaño del paquete y el tamaño de la ventana de

transmisión de acuerdo a la tasa de errores que tengamos en el medio de transmisión y a la rapidez con que queramos transmitir la información. En la tabla 7.2 se muestra el formato de los paquetes Kermit.

El Kermit básico divide el archivo en paquetes de tamaño variable, el cual puede tener un tamaño máximo de 96 bytes (incluyendo encabezado y checksum).

*Tabla 7.2 Formato de los paquetes Kermit [29]*

BYTE	CAMPO	DESCRIPCIÓN
0	MARK	Marca del comienzo del paquete (normalmente Ctrl-A)
1	LEN	Número de caracteres ASCII desde este
2	SEQ	Número secuencial, en módulo 64, comenzando por 0
3	TYPE	Tipo de paquete
4 en adelante	DATA	Contenido del paquete si es el caso
Ultimo	CHECK	Suma de comprobación

El formato Kermit utiliza diferentes tipos de paquetes, además de los paquetes de datos también utiliza paquetes de control, el tipo de paquete se especifica en el campo TYPE, el cual contiene los paquetes correspondientes a las letras mostradas en la tabla 7.3.

Al comienzo de la transmisión, el transmisor y receptor se ponen de acuerdo en los parámetros de la transmisión, para esto, el emisor envía un paquete tipo "S" con seis bytes en el campo de datos, los cuales especifican una serie de parámetros de transmisión que deben ser aceptados o rechazados por el receptor, dichos bytes son [30]:

- **MAXL** Longitud máxima del paquete.
- **TIME** Tiempo máximo que el terminal receptor espera un paquete (en segundos).
- **NPAD** Número de caracteres de relleno.
- **PADC** Carácter utilizado como relleno.
- **EOL** Carácter utilizado para indicar fin de paquete.
- **QTCL** Prefijo que se utiliza cuando se transmiten los caracteres 1 al 31 y 127

De manera optativa pueden ser agregados los siguientes 4 bytes de parámetros:

- **QBIN** Prefijo utilizado para transmitir caracteres de 8 bits
- **CHKT** Es utilizado para seleccionar el tipo de control de errores que se utilizará. 1-Checksum de un carácter, 2-Checksum de dos caracteres y 3-CRC de tres caracteres
- **REPT** Prefijo utilizado para comprimir caracteres repetidos.
- **CAPAS** Carácter que indica capacidades que se pueden agregar al protocolo, como son Ventana deslizante y la utilización de paquetes grandes.

Después que emisor y receptor se pusieron de acuerdo sobre los parámetros de envío, el emisor envía el paquete "F" con los datos del archivo, entre ellos el nombre, una vez recibida la confirmación por parte del receptor, da inicio el envío de los datos del archivo, a través de paquetes tipo "D", para finalizar el envío del archivo, el emisor envía un paquete tipo "Z", si hay mas archivos a enviar, prosigue con el proceso enviando los atributos del siguiente archivo, si no hay mas archivos envía el paquete "B" indicando el fin de la transmisión; cada uno de los paquetes mencionados debe de ser confirmado con un ACK.

En la figura 7.2 se muestra el proceso de transmisión de archivos utilizando Kermit, en la cual se puede visualizar de forma grafica como opera el protocolo.

*Tabla 7.3 Tipos de paquetes de Kermit [29]*

TIPO	DESCRIPCIÓN
D	Paquete de datos
Y	Confirmación, ACK (Affirmative Acknowledgement)
N	Rechazo, NAK (Negative Acknowledgement)
S	Comienzo de envío (intercambio de parámetros)
B	Fin de transmisión, EOT
F	Datos del fichero o paquete de cabecera del archivo
Z	Fin de archivo, EOT
E	Error
T	Reservado para uso interno
I	Iniciación (intercambio de parámetros)
A	Atributos del fichero
R	Comienzo de recepción
C	Comando de Host
K	Comando Kermit
G	Comando Kermit genérico

Existen versiones de Kermit que pueden transmitir paquetes más grandes llegando a transmitir hasta 9000 bytes en el mismo paquete, esto se logra si tanto el transmisor y receptor admiten dicha versión del protocolo, durante la negociación inicial el transmisor especifica el uso de paquetes grandes a través del campo CAPAS, si el receptor puede trabajar con ese tamaño de paquete, no modifica el bit que lo especifica.

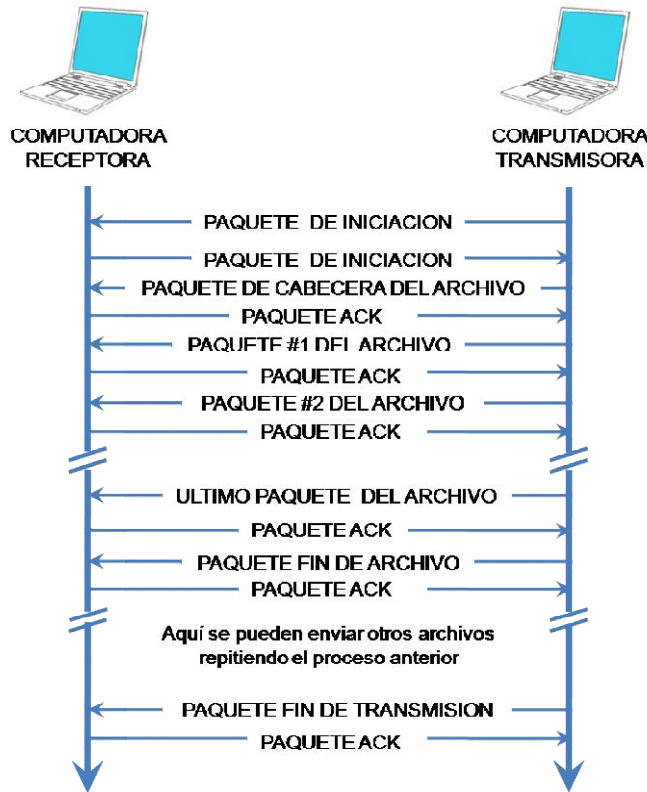


Figura 7.2. Envío y recepción de archivo utilizando Kermit [29]

### 7.2.3 EKermit

A lo largo de sus más de 30 años de existencia, el protocolo Kermit ha sido escrito en más de 130 lenguajes de programación.

Existe una versión simplificada del protocolo Kermit llamada EKermit (Kermit Embebido) escrita en lenguaje C y diseñada para poder implementarse en dispositivos embebidos de pequeña capacidad que no cuentan con un sistema operativo, esta versión aun siendo una versión sencilla implementa todos los mecanismos del protocolo Kermit, como son [32]:

- Paquetes largos
- Ventanas corredizas con recuperación de errores Go-Back-to-N
- Compresión de caracteres repetidos
- Control de caracteres prefijo y sufijo
- Octavo bits prefijo (para la transferencia de datos de 8 bits en los enlaces de 7 bits)
- Paquetes de atributos de archivo (tipo, tamaño y fecha)
- Envío y recepción de archivos individuales o múltiples.

- Tres tipos de verificación de errores (Checksum de 6 ó 12 bits y CRC de 16 bits).
- Los informes de estado (estado de protocolo, nombre de archivo, tamaño, fecha y hora, bytes hasta el momento).
- Cancelación de transmisión por cualquiera de las partes.

### **7.3 Implementación del EKermit en el software para descarga de imágenes por Banda S**

El protocolo EKermit 1.7 es muy completo, el hecho de implementar el mecanismo de ventanas corredizas (go-back-to-end) o incluso de de ventanas corredizas con repetición selectiva lo hacen un protocolo muy eficiente.

Sin embargo, para la implementación en el proyecto del nanosatélite universitario, algunas de sus características no son necesarias y el eliminarlas simplifica el código que será ejecutado por la computadora de vuelo.

- Aun cuando los mecanismos de ventanas corredizas son muy eficientes, es necesaria una comunicación full-duplex, lo cual no es posible utilizando el modem n2420 que realiza un enlace en modo half-duplex.

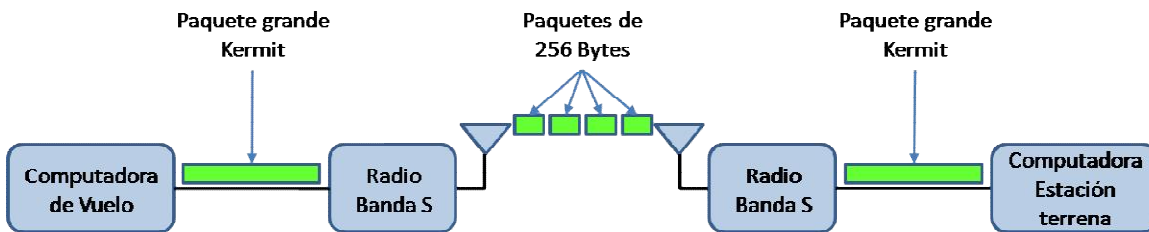
En nuestra implementación utilizaremos tamaño de ventana de transmisión y recepción iguales a 1, lo que lo convierte en un protocolo stop-and-wait

- La compresión de caracteres es útil para ciertos tipos de archivos que tienen muchos caracteres repetidos consecutivos, sin embargo para el caso de las imágenes satelitales esto no ocurre y el mecanismo de compresión en lugar de ayudar a hacer más rápida la comunicación, agrega tiempo de procesamiento.
- El octavo bit prefijo es un mecanismo implementado en Kermit que permite enviar caracteres de 8 bits por un canal de 7 bits, sin embargo en nuestro caso no es necesario puesto que el modem n2420 puede transmitir cualquier carácter de 8 bits, por lo que se suprimirá este mecanismo.

Una característica muy interesante es el tamaño de paquete el cual se especifica a la hora de iniciar la transferencia de la imagen y que puede especificarse un tamaño pequeño de paquete para entornos muy ruidosos o un tamaño grande para agilizar la transferencia del archivo cuando el canal de comunicaciones lo permita.

Otros aspectos a considerar es el tamaño máximo de paquete que se configure en el modem n2420 ya que aun cuando el paquete kermite sea muy grande, el modem dividirá dicho paquete en paquetes más pequeños según se especifique en el registro S112, lo cual es provechoso para la capa física ya que si se daña uno de esos pequeños paquetes es muy probable que sea corregido por el modem receptor, siendo transparente para Kermit.

El tamaño de buffer determina que tan grande será el paquete Kermit, ya que si el buffer es pequeño se corre el riesgo de desbordar el buffer al enviarle un paquete grande.



*Figura 7.3. Envío de paquetes Kermit por Banda S*

# Conclusiones

## Conclusiones

Se analizaron sistemas de comunicaciones en banda S de tres diferentes empresas especializadas en proveer hardware para la construcción de CubeSats, se seleccionó el sistema en banda S que mejor se adapta a nuestros requerimientos, tomando en cuenta la utilización de componentes COTS con experiencia de vuelo.

Una vez adquirido dicho sistema de comunicaciones se procedió a la realización de pruebas de transmisión en canales de comunicación con diferentes características. En un canal de comunicación con mucho ruido e interferencia (10 km) fue imposible transmitir utilizando el protocolo Zmodem (que es un protocolo de streaming) aún utilizando la corrección de errores, sin embargo si fue posible el envío de paquetes cortos (lo cual se controla configurando el registro S112 del modem) utilizando un protocolo con control de flujo como Kermit. En un canal de comunicaciones con poco ruido e interferencia (22 km) la transmisión se llevó a cabo sin problemas. Esto nos llevó a seleccionar el protocolo Kermit (más específicamente E-Kermit) como protocolo de envío de imágenes de satélite, ya que es muy robusto, adaptable y eficiente si se configura correctamente.

A nivel hardware se logró adaptar eléctrica y mecánicamente el sistema en banda S para ser montado en el nanosatélite universitario y conectarlo con los demás subsistemas satelitales y de estación terrena.

# Anexo

## A.1 Velocidad Orbital

Para un satélite que gira alrededor de la tierra en una órbita circular, su velocidad orbital está dada por

$$v_{orb} = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (\text{a.1})$$

Donde:

$v_{orb}$  es la velocidad orbital,

$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$  la constante gravitacional,

$M = 5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$  la masa de la tierra y

$r = (6378 \times 10^3 \text{ m}) + (600 \times 10^3 \text{ m}) = 6978 \times 10^3 \text{ m}$  el radio de la orbita.

Sustituyendo en (a.1)

$$v_{orb} = \sqrt{\frac{\left(6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2\right) (5.98 \times 10^{24} \text{ kg})}{6978 \times 10^3 \text{ m}}}$$



$$v_{orb} = 7560 \text{ m/s} = 27216 \text{ km/h}$$

El perímetro de la órbita del satélite se calcula con

$$p_{orb} = 2\pi r \quad (\text{a.2})$$

Sustituyendo valores

$$p_{orb} = 2(3.1416)(6978 \times 10^3 \text{ m})$$

$$p_{orb} = 43,844 \times 10^3 \text{ m} = 43,844 \text{ km}$$

Por lo tanto el tiempo que tarda el satélite en dar una vuelta a la tierra se calcula con la siguiente fórmula:

$$t_{vuelta} = \frac{p_{orb}}{v_{orb}} \quad (\text{a.3})$$

$$t_{vuelta} = \frac{43,844 \text{ km}}{27216 \text{ km/h}}$$

$$t_{vuelta} = 1.61 \text{ h} = 96.65 \text{ minutos}$$

Para calcular el tiempo que el satélite permanece en contacto con la estación terrena tomaremos en cuenta que debe de estar a un ángulo igual o mayor a  $45^\circ$  sobre la horizontal, en la figura A.1 aparece señalado el arco AB que es la porción de la órbita en la cual el satélite es visible, nótese que el ángulo  $AOB = 2\alpha$  es el que describe el arco de AB.

Utilizando el valor calculado de  $\alpha$

$$AOB = 2(4.74^\circ) = 9.48^\circ$$

El tiempo durante el cual el satélite será visible es

$$\frac{t_{AOB}}{9.48^{\circ}} = \frac{t_{vuelta}}{360^{\circ}}$$

$$\frac{t_{AOB}}{9.48^{\circ}} = \frac{96.65 \text{ minutos}}{360^{\circ}}$$

$$t_{AOB} = 2.54 \text{ minutos}$$

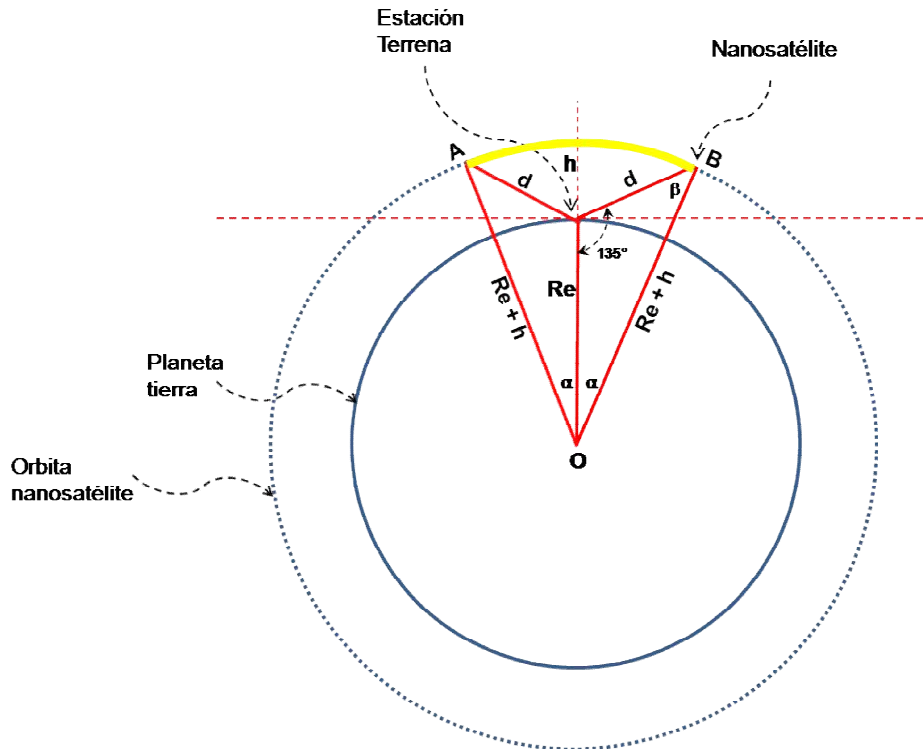


Figura A.1 Arco de trayectoria del nanosatélite en el cual es visible desde la estación terrena.

## A.2 Modulación GFSK

En la modulación FSK, los cambios en la información digital (de cero a uno y de uno a cero) ocasionan cambios abruptos de voltaje en el VCO (Oscilador Controlado por Voltaje, típicamente utilizado para modular en frecuencia), aunado a la necesidad de mantener suficiente distancia entre las dos frecuencias asignadas al 0 y al 1, ocasionan que se ocupe relativamente más ancho de banda que otros tipos de modulaciones.

La modulación GFSK reduce considerablemente el ancho de banda que requiere FSK, al colocarse un filtro gaussiano antes del modulador (Figura A.2) “suaviza” la señal binaria y provoca que el “switcheo” de frecuencia no sea de manera abrupta sino de forma “suave”, finalmente obtenemos a la salida una señal reducida en ancho de banda.

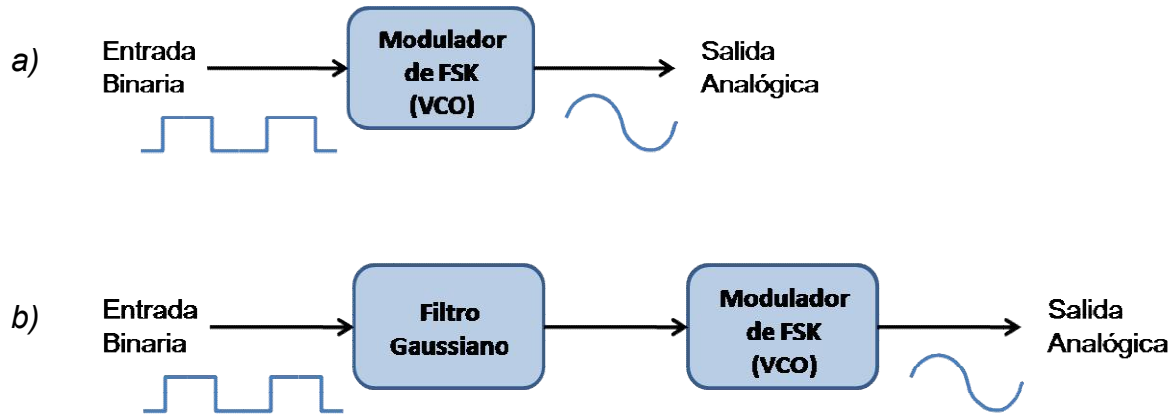


Figura A.2 a) Modulación FSK [16], b) Modulación GFSK [16].

### A.3 Espectro ensanchado

Es una técnica mediante la cual se consigue que la información transmitida ocupe un mayor ancho de banda que el que ocupa normalmente, fue inventada y patentada en 1942 por la estrella de Hollywood Hedy Lamarr, en un inicio no pudo ser puesto en práctica debido a que el desarrollo tecnológico de aquel tiempo no lo permitía, tiempo después fue el ejercito el que empezó a utilizar dicha tecnología debido a que se puede lograr una mayor inmunidad al ruido.

Actualmente la técnica de espectro ensanchado es ampliamente utilizada en las comunicaciones inalámbricas (como ejemplo WiFi y Bluetooth hacen uso de ella), ya que utilizando esta técnica se consigue:

- Más inmunidad ante diversos tipos de ruido y distorsión multitrayectoria. Las primeras aplicaciones del esquema de espectro ensanchado eran militares, donde se usaba por su inmunidad a interferencias.
- También puede utilizarse para ocultar y cifrar señales. Solo un usuario que conozca el código expansor podrá recuperar la información codificada.
- Varios usuarios independientes pueden utilizar el mismo ancho de banda con muy pocas interferencias entre sí. Esta propiedad es usada en aplicaciones de telefonía celular a través del empleo de una técnica

conocida como multiplexación por división de código (CDMA, *Code División Multiple Access*).

Existen dos formas de lograr ensanchar el espectro, salto de frecuencia y secuencia directa, el primero se logra al lograr que la onda portadora “salte” cada determinado tiempo a una frecuencia diferente siguiendo una secuencia pseudoaleatoria la cual es conocida tanto por el transmisor como por el receptor, la segunda técnica se logra al substituir cada bit de la señal original por una secuencia de bits (código de expansión), los cuales son transmitidos.

### A.3.1 Espectro ensanchado por salto de frecuencias

La técnica de espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS, *Frecuency Hopping Spread Spectrum*) se logra al cambiar de manera pseudoaleatoria de frecuencia de transmisión de tal manera que un receptor ajeno que intente recibir la información solo podrá recibir unos pocos bits de información al desconocer cuál será la siguiente frecuencia en la que se transmitirá, una de sus ventajas más importantes es que la señal presenta mayor inmunidad al ruido, lo cual es muy importante en un enlace satelital.

La figura A.3 muestra una implementación de un emisor de FHSS en el cual se puede observar por una parte un generador de números pseudoaleatorios (aquí se podría utilizar un microprocesador) el cual seleccione un canal diferente cada vez en la tabla de canales y el sintetizador de frecuencia genera el tono correspondiente, el mezclador recibe este tono lo mezcla con la señal de información modulada previamente en FSK o BPSK, el último paso es aplicar un filtro pasa banda a la salida del mezclador para eliminar las frecuencias generadas que son ajenas a la banda en la cual transmitiremos.

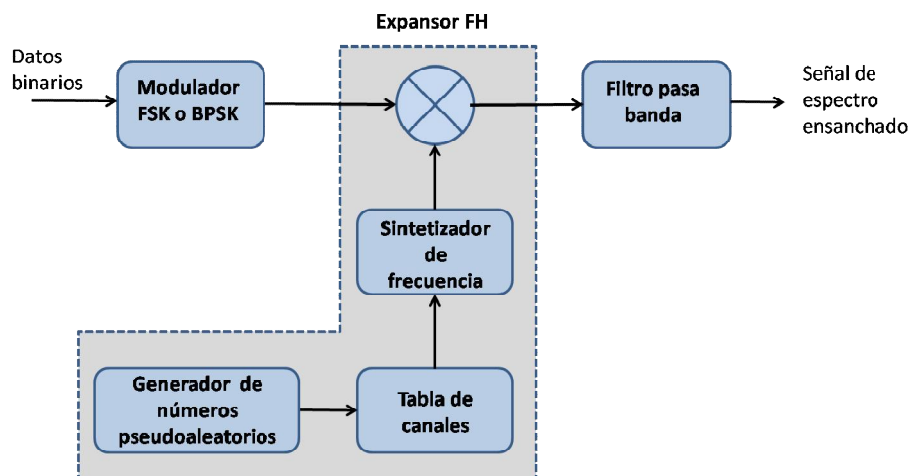


Figura A.3 Emisor de espectro ensanchado por salto de frecuencia [9]

El receptor de FHSS (Figura A.4) debe de tener conocimiento de la secuencia de frecuencias de salto que utiliza el transmisor, además de estar sincronizado con este. El receptor realiza el proceso inverso (se podría decir que realiza una compresión del espectro), el mezclador recibe el tono que indica el generador de números pseudoaleatorios y lo mezcla con la señal de espectro disperso, la salida del mezclador se pasa al filtro pasa banda para eliminar las frecuencias que no son de nuestro interés y finalmente se demodula para obtener los datos binarios.

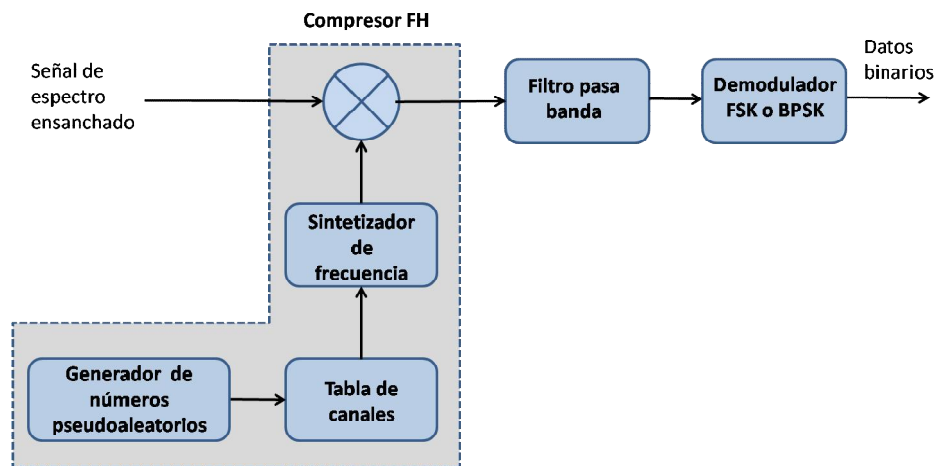


Figura A.4 Receptor de espectro ensanchado por salto de frecuencia [9]

## A.4 Comandos Hayes

Los comandos Hayes fueron introducidos por la empresa Hayes Microcomputer, con la finalidad de poder configurar su línea de módems “Smartmodems”, esta empresa acaparaba un gran porcentaje del mercado de módems para PC en aquellos años, y la gran mayoría del software de comunicaciones era compatible con los comandos Hayes, lo que facilitó que dichos comandos se convirtieran en un estándar y fueran adoptados por otros fabricantes de modems.

Los comandos Hayes pueden ser ejecutados desde cualquier emulador de terminal (por ejemplo Hyperterminal) y son transmitidos al modem vía puerto serie.

Casi todos los comandos Hayes empiezan con las letras “AT” (del inglés Attention) por lo que también se les conoce como comandos “AT”, los comandos Hayes se pueden clasificar en cuatro grupos:

- **Comandos Básicos**, (Tienen la forma “AT...”). Son los comandos introducidos originalmente por Hayes Microcomputer.
- **Comandos De registro**, (Tienen la forma “ATS<sub>n</sub>=...” o “ATS<sub>n</sub>?” donde n es el número de registro). Nos permiten cambiar o visualizar los valores almacenados en los registros S (en el siguiente apartado se hablará de los registros S).
- **Comandos Extendidos**, (Tienen la forma “AT&...”) Son comandos introducidos posteriormente dada la necesidad de ampliar el conjunto de comando.
- **Comandos Proprietarios** (Tienen la forma “AT/...”). Definidos por el fabricante del modem.

## Referencias

- [1] Sitio Web Calpoly. <http://polysat.calpoly.edu/launched-missions/cp1>
- [2] Sitio Web Calpoly. <http://polysat.calpoly.edu/launched-missions/cp3>
- [3] Sitio Web CubeSat. <http://wwd.cubesat.org/index.php/media/pictures/54-p-pod-mk-i>
- [4] Sitio Web Academy Aerospace Quality. “Commercial Off-the-Shelf (COTS) Tutorial”.URL: <http://aaq.auburn.edu/node/697>. (Consulta: Agosto2015).
- [5] Documento en línea, Bryan Klofas, <http://www.klofas.com/comm-table/table.pdf> (Consulta: Agosto 2015)
- [6] Documento en línea, Recomendación UIT-R V.431-7, “Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones”, 2000.
- [7] Flemming Hansen, “Danish Small Satellite Programme”, Impressions from 15th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2001
- [8] Jim Zyren, “Tutorial on Basic Link Budget Analysis”, Intersil application notes, pag 2.1-2.8, 1998
- [9] William Stallings, “Comunicaciones y redes de computadores”, Septima Edición, PEARSON EDUCACIÓN S.A., 2004
- [10] Sitio Web, [http://www.cubesatshop.com/index.php?option=com\\_virtuemart&page=shop.browse&category\\_id=5&Itemid=67](http://www.cubesatshop.com/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.browse&category_id=5&Itemid=67)
- [11] Documento en línea, [http://www.isispace.nl/brochures/ISIS\\_TXS\\_Brochure\\_v.12.4.pdf](http://www.isispace.nl/brochures/ISIS_TXS_Brochure_v.12.4.pdf)
- [12] Sitio Web, [http://www.clyde-space.com/cubesat\\_shop/communication\\_systems/301\\_cubesat-s-band-transmitter](http://www.clyde-space.com/cubesat_shop/communication_systems/301_cubesat-s-band-transmitter)
- [13] Documento en línea, [www.clyde-space.com/documents/2987](http://www.clyde-space.com/documents/2987)
- [14] Documento en línea, <http://www.controlsyste.msusa.com/controlsyste.msusa/download/nanoseriesoperatingmanual.pdf>
- [15] Documento en línea <http://www.microhardcorp.com/brochures/n2420.Brochure.Rev.1.3.pdf>

- [16] Tomasi, Wayne, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. (V. García y R. Bravo, Trads). Editorial PRENTICE HALL HISPANOAMERICANA, México, 1996.
- [17] Matthew P. Schroer, A Cubesat Communication, System Design, Test and Integration, Naval Post-graduate School, Monterey, California, julio 2009
- [18] Tommy Shing, Hung Tran, Simulation Based Testing Environment for the GeneSat-1 Spacecraft, Santa Clara University, 2005.
- [19] Robert Hoyt, Jeffrey Slostad, The Multi-Application Survivable Tether (MAST) Experiment, Tethers Unlimited Inc, 2005.
- [20] Sitio Web, <http://www.microhardcorp.com/n2420.php>
- [21] Bernardo del Moral Perea, "Diseño y fabricación de computadora de 32 bits para satélite experimental", Tesis de licenciatura en electrónica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM 2014.
- [22] Documento en línea, <http://www.ti.com/lit/ds/spns192b/spns192b.pdf>
- [23] Documento en línea, <http://www.ti.com/lit/ug/slau049f/slau049f.pdf>
- [24] Sergio Peña Ruiz, "Análisis paramétrico de una antena rómbica planar de cruz", Tesis de posgrado de telecomunicaciones de la ESIME-Zacatenco del IPN 2011.
- [25] Documento en línea, [http://www.yaesu.co.uk/files/G-5500%20Operating%20Manual\\_a.pdf](http://www.yaesu.co.uk/files/G-5500%20Operating%20Manual_a.pdf)
- [26] Sitio Web, [http://qrznow.com/?attachment\\_id=3973](http://qrznow.com/?attachment_id=3973)
- [27] Sitio Web, <http://realterm.sourceforge.net/>
- [28] Sitio Web, <http://www.columbia.edu/kermit/perf.html>
- [29] José Antonio Carballar Falcón, "El libro de las comunicaciones del PC", Primera Edición, RA-MA Editorial, Madrid España, 1996
- [30] Frank da Cruz, KERMIT PROTOCOL MANUAL, Sixth Edition, June 1986 Documento en línea, <http://www.kermitproject.org/kproto.pdf>
- [31] Sitio Web, <http://www.columbia.edu/kermit/index.html>
- [32] Sitio Web, <http://www.kermitproject.org/ek.html>