

IMPLEMENTACION Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE  
COMUNICACIONES DE LA ESTACIÓN TERRENA CUBESAT USCO  
PROYECTO CUBESAT-UD-USCO TELEMEDICINA Y TELEMETRÍA

DIEGO LOZANO CLAROS

OSCAR FERNANDO VELASQUEZ CHALA

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
NEIVA, HUILA  
2008

IMPLEMENTACION Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE  
COMUNICACIONES DE LA ESTACIÓN TERRENA CUBESAT USCO  
PROYECTO CUBESAT-UD-USCO TELEMEDICINA Y TELEMETRÍA

DIEGO LOZANO CLAROS

OSCAR FERNANDO VELASQUEZ CHALA

Proyecto de grado presentado para optar  
al título de Ingeniero Electrónico

Director  
CARLOS ALBERTO PEREZ  
Ingeniero Electrónico Msc.

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
NEIVA, HUILA  
2008

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del primer jurado

---

Firma del segundo jurado

Neiva, 5 de Septiembre de 2008

A Dios todopoderoso;  
A mis padres Paulo y Silvia;  
A mis hermanos Mónica, Ederleht y Pablo;  
A mis sobrinos Germán y Valentina.

**DIEGO LOZANO CLAROS**

A mis padres María Nirza y Francisco Javier;  
A mis hermanos Juan Francisco, Javier Camilo y Luis Miguel;  
A mi tía Dora Elena.

**OSCAR FERNANDO VELASQUEZ CHALA**



## **AGRADECICMIENTOS**

A nuestras familias por su apoyo, colaboración y confianza durante el proceso de formación. Al ingeniero Carlos Alberto Pérez por dedicar parte de su tiempo en la dirección de éste proyecto.

A los ingenieros Neizar Salazar y José de Jesús Salgado Patrón por su colaboración en la revisión y evaluación del proyecto.

Al grupo Gitusco, en especial a Camilo y a Oscar, por su colaboración e interés.

A los profesores de la Universidad Surcolombiana y Distrital, en especial al ingeniero Yamil Cerquera.

Y a todas las personas que de una u otra forma colaboraron con la implementación Estación Terrena.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. CALCULO DEL RADIOENLACE	19
1.1 PÉRDIDAS POR ESPACIO LIBRE	20
1.2 PÉRDIDAS POR POLARIZACION	21
1.3 PÉRDIDAS POR LLUVIA	22
1.4 PÉRDIDAS POR APUNTAMIENTO	22
1.5 PÉRDIDAS ATMOSFERICAS	22
1.6 PÉRDIDAS POR LINEA DE TRANSMISION	23
1.6.1 Pérdidas por línea de transmisión en la Estación	23
1.6.2 Pérdidas por conectores	24
1.6.3 Pérdidas por línea de transmisión en el satélite	25
1.7 PÉRDIDA POR INSERCIÓN DE FILTRO Y LNA	25
1.8 CALCULO DE AMPLIFICADOR DE BAJO RUIDO – LNA	25
1.9 SISTEMA DE TEMPERATURA	26
1.9.1 Sistema de temperatura en la Estación	27
1.9.1.1 Temperatura de la antena ( $T_a$ )	27
1.9.1.2 Coeficiente de línea $\alpha$	28
1.9.1.3 Temperatura de ruido de LNA ( $T_{LNA}$ )	28
1.9.1.4 Temperatura de ruido del radio ( $T_{Radio}$ )	28
1.9.2 Sistema de temperatura en el satélite	28

1.9.2.1	Temperatura de la antena ( $T_a$ )	29
1.9.2.2	Coeficiente de línea $\alpha$	29
1.9.2.3	Temperatura de ruido de LNA ( $T_{LNA}$ )	29
1.9.2.4	Temperatura de ruido del radio ( $T_{Radio}$ )	29
1.10	PARAMETROS DEL ENLACE	30
1.10.1	Potencia recibida ( $P_R$ )	30
1.10.2	Potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE)	31
1.10.3	Figura de merito G/T	31
1.10.4	Nivel de potencia isotrópica recibida (NPIR)	31
1.10.5	Densidad de potencia de la relación señal a ruido (S/No)	32
1.10.6	Energía de bit ( $E_b/N_o$ )	32
1.10.7	Cálculo de potencia del ruido ( $P_N$ )	32
1.10.8	Relación señal a ruido (S/N)	32
2.	ESTADO DE LA ESTACION	35
2.1	DESCRIPCION DEL HARDWARE	36
2.1.1	Torre	36
2.1.2	Antenas	37
2.1.3	Radios	38
2.1.3.1	Kenwood TM – D700	38
2.1.3.2	Yaesu FT – 7800	40
2.1.3.3	Yaesu VX – 3R y VX-6R	40
2.1.4	Interface ICU G-5500	41
2.1.5	Interface GS-232B	41

2.1.6 Rotor GS-5500 y control GS-5500	41
2.1.7 Vatímetro & SWR Diamond SX-400	42
2.1.8 GPS (GARMIN Etrex SUMMIT)	43
2.1.9 Analizador de Espectro	45
2.1.10 Fuente de corriente Diamond GZV-4000	46
2.1.11 Amplificador de bajo ruido LNA	46
2.1.12 Conmutador coaxial AS-304	46
3. PROGRAMA DE LA ESTACIÓN TERRENA	47
3.1 PROGRAMAS DE PREDICCIÓN	49
3.1.1 WXtrack	50
3.1.2 WinOrbit	51
3.1.3 Orbitron	53
3.2 BASE DE DATOS	55
3.3 PROET	56
3.3.1 PROET_RADIO	56
3.3.2 PROET_TNC	59
3.3.3 PROET_ROTOR	60
3.3.4 PROET_ENLACE	63
3.3.5 PROET_ADQUISICIÓN	66
4. MONTAJE Y PRUEBAS	69
4.1 MEDICIÓN SWR	69
4.2 MEDICIÓN DEL PATRÓN DE RADIACIÓN	75
4.3 MEDICION DE INTERFERENCIA	84

4.4 RADIO ENLACE SATELITAL	88
5. CONCLUSIONES	94
6. RECOMENDACIONES	97
6.1 LEGALES	97
6.2 ADQUISICIÓN DE EQUIPOS	97
6.3 UBICACIÓN	97
6.4 PRUEBAS	98
6.5 EQUIPOS	98
6.6 PROGRAMA	100
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Relación entre altura de orbita y distancia crítica.	21
Cuadro 2. Pérdidas por espacio libre.	21
Cuadro 3. Relación ángulo de elevación y pérdidas atmosféricas.	23
Cuadro 4. Pérdidas en decibeles de los cables por cada 30m.	23
Cuadro 5. Pérdidas por línea de transmisión para las frecuencias de subida y bajada.	24
Cuadro 6. Pérdida por conectores.	24
Cuadro 7. Pérdida por línea de transmisión para las frecuencias de subida y bajada.	25
Cuadro 8. Pérdidas por inserción del filtro y LNA.	25
Cuadro 9. Resumen de datos.	30
Cuadro 10. Resumen cálculo del enlace de subida.	33
Cuadro 11. Resumen cálculo del enlace de bajada.	34
Cuadro 12. Especificaciones de la Estación USCO.	35
Cuadro 13. Características de las antenas.	37
Cuadro 14. Lista de algunos comandos del radio Kenwood.	39
Cuadro 15. Materiales y equipos de la prueba SWR.	69
Cuadro 16. Resultados obtenidos a partir de la medición del SWR para la antena Cushcraft 13B2.	71
Cuadro 17. Resultados obtenidos a partir de la medición del SWR para la antena Cushcraft A44911S.	73
Cuadro 18. Materiales y equipos de la prueba para medir el patrón de radiación.	75
Cuadro 19. Condiciones de la prueba para la antena elementos sobre el boom.	78
Cuadro 20. Condiciones de la prueba para la antena de elementos incrustados en el boom.	79
Cuadro 21. Condiciones de la primera prueba para la antena Cushcraft A44911S.	80
Cuadro 22. Condiciones de la segunda prueba para la antena Cushcraft A44911S.	80
Cuadro 23. Condiciones de la prueba para la antena Cushcraft 13B2.	82
Cuadro 24. Pruebas de comunicación satelital de recepción.	90
Cuadro 25. Pruebas de comunicación satelital de recepción y transmisión.	93

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Distancia critica entre la Estación y el satélite.	20
Figura 2. Pérdidas por apuntamiento.	22
Figura 3. Diagrama de interconexión de los equipos.	24
Figura 4. Sistema de comunicaciones del satélite.	25
Figura 5. Mástil, rotor y boom.	37
Figura 6. Radio Kenwood TM – D700.	38
Figura 7. Radio Yaesu FT – 7800R.	40
Figura 8. Radios Yaesu VX – 3R y VX-6R.	40
Figura 9. ICU G-5500.	40
Figura 10. GS-232B.	40
Figura 11. Rotor GS-5500 y control GS-5500.	41
Figura 12. Conexión del control GS-5500 y la interface GS-232B.	42
Figura 13. Vatímetro & SWR Diamond SX-400.	42
Figura 14. Parte trasera del Vatímetro & SWR Diamond SX-400.	43
Figura 15. GPS GARMIN Etrex SUMMIT.	43
Figura 16. Apariencia programa GEOCALC.	44
Figura 17. Método alineación de las antenas con el norte.	45
Figura 18. Analizador de espectro.	45
Figura 19. Fuente de corriente Diamond GZV-4000.	46
Figura 20. LNA.	46
Figura 21. Conmutador coaxial.	46
Figura 22. Diagrama en bloques del funcionamiento del programa.	48
Figura 23. Apariencia del WXtrack.	50
Figura 24. Configuración del WXtrack.	51
Figura 25. Apariencia del WinOrbit.	52
Figura 26. Configuración del WinOrbit. Coordenadas estación terrena.	53
Figura 27. Configuración del WinOrbit. Tiempo UTC y Satélite.	53
Figura 28. Apariencia del Orbitron.	54
Figura 29. Configuración del Orbitron.	54
Figura 30. Vista base de datos.	55
Figura 31. Interface grafica de PROET_RADIO.	57
Figura 32. Diagrama de flujo del funcionamiento de PROET_RADIO.	58
Figura 33. Interface gráfica de PROET_TNC.	60
Figura 34. Interface gráfica de PROET_ROTOR.	61
Figura 35. Diagrama de flujo del funcionamiento de PROET_ROTOR.	62
Figura 36. Interface gráfica de PROET_ENLACE. Enlace de subida.	63
Figura 37. Interface gráfica de PROET_ENLACE. Enlace de bajada.	64
Figura 38. Diagrama de flujo del funcionamiento de PROET_ENLACE.	65
Figura 39. Interface gráfica de PROET_ADQUISICIÓN.	67

Figura 40. Diagrama de flujo del funcionamiento de PROET_ADQUISICIÓN.	68
Figura 41. Esquema de conexión para medir SWR.	70
Figura 42. Grafica de los resultados obtenidos a partir de la medición del SWR para la antena Cushcraft 13B2.	72
Figura 43. Gráfica de resultados obtenidos a partir de la medición del SWR para la antena Cushcraft A44911S.	74
Figura 44. Adaptadores tipo T y GAMMA.	75
Figura 45. Esquema de medición del patrón de radiación.	77
Figura 46. Patrón de radiación real de la antena elementos sobre el boom.	78
Figura 47. Patrón de radiación real para antena de elementos incrustados en el boom.	79
Figura 48. Patrón de radiación real de la antena Cushcraft A44911S, primera prueba.	80
Figura 49. Patrón de radiación real de la antena Cushcraft A44911S, segunda prueba.	81
Figura 50. Patrón de radiación real de la antena Cushcraft 13B2	82
Figura 51. Grafica del patrón de radiación. Simulación 144MHz	83
Figura 52. Grafica del patrón de radiación. Simulación 445MHz	83
Figura 53. Esquema de medición interferencias con el analizador de espectro.	84
Figura 54. Esquema de medición de interferencia utilizando el analizador y el rotor.	85
Figura 55. Esquema de medición de interferencia utilizando dos radios y el rotor.	85
Figura 56. Frecuencias registradas desde 143.5 hasta 146MHz.	86
Figura 57. Frecuencias registradas desde 146 hasta 148MHz.	86
Figura 58. Frecuencias registradas desde 430 hasta 435MHz.	87
Figura 59. Frecuencias registradas desde 435 hasta 440MHz.	88
Figura 60. Esquema del sistema de la Estación Terrena USCO.	89



## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Cable Coaxial.	103
Anexo B. Requisitos para la Licencia de Radioaficionado	107
Anexo C. Radios Software.	108
Anexo D. Fotos.	109

## GLOSARIO

**AOS:** son las siglas en ingles de adquisición de señal. Es el momento en el cual una estación receptora terrestre comienza a recibir las señales que emite un satélite.

**APUNTAMIENTO:** alineación del sistema de referencia de las antenas del satélite con respecto al sistema de referencia de las antenas de la estación terrena.

**BALUM:** dispositivo adaptador de impedancias que convierte líneas de transmisión simétricas en asimétricas.

**BER:** es una medida cuantitativa, de extremo a extremo, que evalúa la calidad de la información recibida, y se refiere a la relación entre el número de bits en error que se reciben y el número total de bits que se transmiten en determinado periodo de tiempo.

**BOOM:** elemento que soporta el dipolo y los directores de una antena.

**CÁMARA ANECOICA:** sala especialmente diseñada para absorber señales que inciden sobre las paredes, el suelo y el techo de la misma cámara, anulando interferencias externas. En el campo de las telecomunicaciones, se utiliza para simular condiciones de espacio libre al llevar a cabo la medición de parámetros involucrados en las comunicaciones móviles, como la tasa de absorción específica (SAR, Specific Absortion Rate) de los terminales móviles, o el diseño y caracterización de elementos radiantes tales como antenas y dipolos.

**CODIGO MORSE:** es un sistema de representación de letras y números mediante señales emitidas de forma intermitente (puntos y rayas).

**CONMUTADOR COAXIAL:** dispositivo utilizado para seleccionar una entre varias antenas que comparten un mismo cable coaxial.

**CUBESAT:** el programa CubeSat inició en la Universidad de Stanford en 1999; el propósito es desarrollar una tecnología basada en pico-satélites de órbita baja (LEO) con fines educativos. Los parámetros del pico-satélite son: una masa no mayor a 1 KG y un tamaño que no supere al de un cubo de 10 cm de lado.

**CW:** (Continuous Wave) telegrafía en recepción auditiva, mediante la interrupción de una onda electromagnética continua. Se caracteriza por ocupar poco ancho de banda y por tener una relación señal/ruido muy alta; todo ello permite la comunicación a larga distancia aun en condiciones desfavorables de la propagación.

**ECUACIÓN DE FRIIS:** permite calcular el balance de potencia en un radioenlace formado por un sistema transmisor y un sistema receptor separados una distancia determinada.

**EFECTO DOPPLER:** fenómeno que consiste en la variación de la longitud de onda de cualquier tipo de señal emitida o recibida por un objeto en movimiento.

**ELEVACIÓN:** Angulo entre el plano del horizonte y el satélite.

**GEOMETRIA EUCLIDIANA:** es aquella que estudia las propiedades del plano y el espacio tridimensional.

**LEO:** son las siglas en ingles de órbita terrestre baja (Low Earth Orbit). Es una órbita alrededor de la tierra entre la atmósfera y el cinturón de radiación de Van Allen, con un ángulo bajo de inclinación. Estos límites no están rígidamente definidos, pero están típicamente entre 200 - 1200 km sobre la superficie de la Tierra.

**LNA:** son las siglas en ingles de amplificador de bajo ruido. Es un dispositivo que amplifica las señales recibidas desde el satélite.

**LOS:** son las siglas en ingles de perdida de señal. Es el momento en el cual una estación receptora terrestre deja de captar las señales de radio procedentes de un satélite.

**PIRE:** este parámetro indica la potencia que irradia el sistema transmisor si hipotéticamente se cambiara la antena directiva por un radiador isotrópico.

**POLARIZACIÓN:** fenómeno que puede producirse en las ondas electromagnéticas, por el cual el campo eléctrico oscila sólo en un plano determinado, denominado plano de polarización. Este plano puede definirse por dos vectores, uno de ellos paralelo a la dirección de propagación de la onda y otro perpendicular a esa misma dirección el cual indica la dirección del campo eléctrico.

**PTT:** son las siglas en ingles de pulsar para hablar (Push to Talk). Es un método para hablar en líneas half-duplex de comunicación, apretando un botón para transmitir y liberándolo para recibir.

**SQUELCH:** (o silenciador) es un mando que se encuentra en todos los emisores-receptores de radio. Esta función permite eliminar prácticamente el ruido de fondo en ausencia de comunicación. Esta regulación debe realizarse con precisión y renovarse periódicamente, para no disminuir la capacidad de recepción de la estación.

**TRANSRECEPTOR:** dispositivo que realiza funciones tanto de transmisión como de recepción, utilizando componentes de circuito comunes para ambas funciones.

**VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN:** es la relación entre el número de bits transmitidos y el tiempo empleado cuando se envía un flujo continuo de datos.

## RESUMEN

El proyecto se divide en cinco partes fundamentales: el cálculo de radioenlace, la descripción del hardware y software utilizado, la evaluación de las características de transmisión de los equipos de comunicación, estudio de interferencia y las pruebas de comunicación con satélites radioaficionados y/o Cubesat.

El cálculo del radioenlace se hizo con el fin de tener una base teórica firme para la implementación de la Estación Terrena. Aunque existe un estudio previo (Diseño del sistema de comunicaciones de la estación terrena sede Neiva CUBESAT UD), éste presenta inconsistencias en el cálculo de pérdidas de la señal.

En este proyecto se describen las características de cada uno de los instrumentos, herramientas y dispositivos que conforman la Estación Terrena USCO. Adicionalmente, se describen las ventajas, desventajas, funcionamiento de cada uno de estos. El estudio incluye el diseño de un programa para automatizar el seguimiento del satélite y el sistema de comunicación de la estación terrena, el cual controla la orientación de las antenas de la estación para lograr una correcta alineación con el satélite, además permite utilizar las funciones básicas del radio.

Se hizo un estudio de interferencia para reconocer señales que pueden impedir la recepción completa, o causar pérdida temporal de la señal en las bandas de frecuencia de la estación.

Por último se integró el sistema y se apuntaron las antenas hacia el espacio exterior, se siguió la trayectoria de ocho satélites dando como resultado la recepción de señal **beacon** de cada uno de ellos.

## ABSTRACT

This study is presented into five main sections: the Link Budget calculation, a thorough description of the software and hardware used, an evaluation of the transmission features of the communication devices employed, an analysis of interference, and the try-out runs with amateur radio satellites and/or Cubesat.

The calculation of the Link Budget gives the study a solid theoretical background that informs the implementation of the Ground station. Although a previous study exist (Communication system design for the Usco's Ground Station), it presents some inconsistencies in the signal loss that are further addressed in the current study.

The features of each of the instruments, tools, and devices that make up the USCO Ground station are described in this study. Advantages, disadvantages, and recommendations for each the components are also listed. Also included in this study is the design of a program to automate the satellite tracking and the Ground station's communication system. This program controls the antennas of the station to achieve proper alignment with the satellite and allows for the use of the basic radio features.

An analysis of interference was also carried out in order to identify signals that may impede the full reception or cause a temporary loss of the signal in the frequency bandwidth of the station.

Finally, the system was integrated and the antennas were directed to the outer space where the trajectories of eight satellites were tracked by receiving the **beacon** signal of each one of them.

## INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de las personas para comunicarse desde los grandes centros urbanos hasta lugares remotos ha impulsado un desarrollo académico y tecnológico continuo en diferentes ramas de las telecomunicaciones, una de éstas son las comunicaciones por satélite, campo en el que la Universidad Surcolombiana con apoyo de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas está dando sus primeros pasos con el macroproyecto CUBESAT- UD – USCO telemedicina y telemetría. El aporte más significativo que la Universidad Surcolombiana hace al proyecto CUBESAT es la implementación de la Estación terrena ubicada en la ciudad de Neiva.

Dentro de los desarrollos que hasta el momento se han logrado en la Universidad Surcolombiana, se encuentran:

- El Diseño del Sistema de Comunicaciones: Se fundamenta principalmente en el estudio de la caracterización del canal de comunicaciones.
- Diseño del Sistema de Control: Consta de dos proyectos:
  - Control Físico para el Posicionamiento de la Antena: Es el dispositivo (ICU G-5500) que hace la interface entre PC y el actuador (Rotor G-5500).
  - Control del Desplazamiento y Software de Monitoreo de la Antena.
- Diseño de un Sistema de Antenas para la Transmisión y Recepción de Datos: Es el estudio y simulación de los modelos de antenas que cumplen teóricamente los requisitos en comunicaciones del proyecto,

Este proyecto tiene como finalidad establecer la comunicación entre satélites pertenecientes a la red Cubesat y/o radioaficionados y la Estación Terrena USCO. Durante el proceso de desarrollo fue necesario profundizar en el tema de las comunicaciones satelitales, evaluar el desempeño de los componentes y estudios realizados con anterioridad, y finalmente implementar la Estación Terrena.

## 1. CALCULO DEL RADIOENLACE

El cálculo del radioenlace es fundamental para diseñar cualquier tipo de comunicación inalámbrica. Para esto se deben tener en cuenta todas las pérdidas y ganancias de potencia que existen entre el transmisor y el receptor, en condiciones críticas; con el fin de establecer un límite o margen para que un radioenlace funcione correctamente<sup>1</sup>.

El punto de partida para el análisis es la ecuación de FRIIS, que relaciona la potencia transmitida por una antena y recibida por otra antena:

$$P_r = \frac{G_t \cdot P_t}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot A_r \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde:  $G_t$  : Ganancia de la antena  
 $P_t$ : Potencia de transmisión  
 $d$ : Distancia entre las dos antenas.  
 $A_r$ : Área efectiva

$$A_r = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} \cdot G_r \quad \text{Ec. 1.2}$$

Remplazando: 
$$P_r = \left( \frac{c}{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f} \right)^2 \cdot P_t \cdot G_t \cdot G_r \quad \text{Ec. 1.3}$$

En decibeles:

$$P_r := P_t + G_t + G_r - 32.45 - 20 \cdot \log\left(\frac{d}{1 \cdot \text{km}}\right) - 20 \cdot \log\left(\frac{f}{1 \cdot \text{MHz}}\right) \quad \text{Ec. 1.4}$$

En donde  $L_p = 32.45 + 20 \cdot \log\left(\frac{d}{1 \cdot \text{km}}\right) + 20 \cdot \log\left(\frac{f}{1 \cdot \text{MHz}}\right)$  es llamado pérdidas por espacio libre.

El enlace entre el satélite y la Estación es más complejo y se considerarán otros tipos de pérdidas como: pérdidas por polarización ( $L_{pol}$ ), por lluvia ( $L_{llu}$ ), por apuntamiento ( $L_{apun}$ ), atmosféricas ( $L_{atmos}$ ), por línea de transmisión ( $L_{linea}$ ), y por inserción de filtro LNA ( $L_{filtroLNA}$ )

$$Pr = Pt + Gt + Gr - L_p - L_{pol} - L_{llu} - L_{apun} - L_{atmos} - L_{linea} - L_{filtroLNA} \quad \text{Ec. 1.5}$$

A continuación se calculan cada una de estas pérdidas.

---

<sup>1</sup> El cálculo de radioenlace se hizo con el fin de tener una base teórica firme para la implementación de la Estación Terrena. Aunque existe un estudio previo (Diseño del sistema de comunicaciones de la estación terrena sede Neiva CUBESAT UD) este presenta inconsistencias.

## 1.1 PÉRDIDAS POR ESPACIO LIBRE

Son las pérdidas producidas por la atenuación que sufre una señal al viajar por el espacio libre. Depende de la distancia entre el transmisor y el receptor, y de la frecuencia de trabajo de la señal, en donde la frecuencia de subida es 146 MHz y la frecuencia de bajada 438 MHz.

$$L_p = 32.45 + 20 \cdot \log\left(\frac{d}{1 \cdot \text{km}}\right) + 20 \cdot \log\left(\frac{f}{1 \cdot \text{MHz}}\right) \quad \text{Ec. 1.6}$$

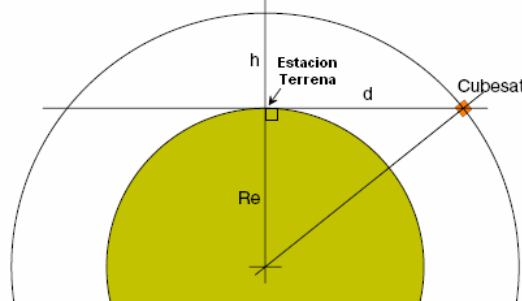
d = Distancia oblicua en Kilómetros.

F = Frecuencia en MHz.

La distancia tiene un estudio especial, hay que tomar la distancia más lejana entre la estación y el satélite, la cual se llamara distancia crítica.

La distancia crítica se presenta cuando el satélite esta en el horizonte de la estación como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Distancia critica entre la Estación y el satélite.



Para este cálculo es necesario asumir que la superficie de la Tierra y la órbita del satélite son circunferencias perfectas. Empleando geometría euclidiana se llega a la siguiente ecuación:

$$d = \sqrt{2 \cdot R_e \cdot h + h^2} \quad \text{Ec. 1.7}$$

Donde:

Re: Radio de la Tierra = 6378 Km

h = Altura de órbita

Los satélites de radioaficionados y Cubesat de órbitas LEO se encuentran entre 600Km y 800Km. Reemplazando en la ecuación 1.7 se hallan las distancias críticas para el rango de alturas.



Cuadro 1. Relación entre altura de orbita y distancia crítica.

<b>Altura (h) (Km.)</b>	<b>Distancia (d) (Km.)</b>
600	2830.8
650	2951.9
700	3069.0
750	3182.7
800	3293.1

Reemplazando las distancias críticas y las frecuencias de trabajo en la ecuación 1.6, se obtienen las pérdidas por espacio libre.

Cuadro 2. Pérdidas por espacio libre.

<b>Altura (h) (Km.)</b>	<b>Distancia (d) (Km.)</b>	<b>L<sub>p</sub>subida (dB)</b>	<b>L<sub>p</sub>bajada (dB)</b>
600	2830.8	144.77	154.31
650	2951.9	145.13	154.68
700	3069.0	145.47	155.01
750	3182.7	145.79	155.33
800	3293.1	146.08	155.63

## 1.2 PÉRDIDAS POR POLARIZACION

Estas pérdidas se presentan en las comunicaciones satelitales debido a las siguientes razones:

- Cuando se transmite una señal de una antena de polarización lineal a otra con polarización circular y viceversa.
- Por el efecto Faraday, el cual produce una rotación del campo eléctrico de la señal cuando atraviesa el campo magnético de la capa Ionosférica.
- Por el movimiento de rotación que el satélite hace alrededor de su eje.

La universidad Lulea hizo un estudio profundo<sup>2</sup> en el tema teniendo en cuenta las razones citadas y establece que las pérdidas teóricas se encuentran entre 2dB y 3dB para una polarización lineal circular. Se asumirá los 3dB por ser la mayor pérdida.

---

<sup>2</sup> Tesis “Design, development and operation of a student ground station” Autor: A.B.A.T Wickramanayake, pagina 30. Universidad de Lulea.

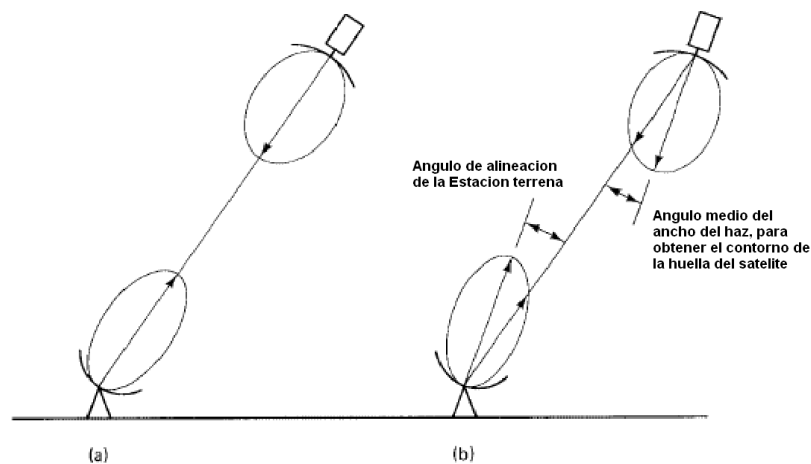
### 1.3 PÉRDIDAS POR LLUVIA

Este tipo de pérdida se desprecia<sup>3</sup> para frecuencia menores a 2 GHz, por lo tanto no es necesario hacer el análisis.

### 1.4 PÉRDIDAS POR APUNTAMIENTO

Pérdidas producidas por la desalineación entre las antenas de la estación terrena y las del satélite, éstas dependen principalmente de las características de las antenas como la ganancia y el ancho del haz. Las pérdidas teóricas<sup>4</sup> se encuentran entre 0.1dB y 1 dB

Figura 2. Pérdidas por apuntamiento.



Fuente: RODDY, Dennis. Satellite Communications. Third edition. p. 309

Se asume que las pérdidas por apuntamiento serán de **1dB**

### 1.5 PÉRDIDAS ATMOSFERICAS

Son pérdidas producidas por gases mayoritarios de la atmósfera (nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, hidrógeno, etc.). Estas pérdidas dependen del número total de moléculas distribuidas en el camino entre la estación terrena y el satélite, esto significa que las pérdidas dependen del ángulo de elevación del satélite (ver Cuadro 3).

Dependiendo de las características topográficas alrededor de la estación terrena se estima un ángulo mínimo de elevación de **5°**, por tanto, se tendrá una pérdida máxima de **2.1dB**

<sup>3</sup> Tesis "Layout of a Communication Subsystem for the Pico-Satellite MOVE" Autor Alexander Friedl pagina 35. Universidad Tecnica de Múnchen.

<sup>4</sup> " The CubeSat Ground Station at the University of Arizona"

Cuadro 3. Relación ángulo de elevación y pérdidas atmosféricas

Angulo de elevación	Pérdidas (dB)
0°	10,2
2,5°	4,6
5°	2,1
10°	1,1
30°	0,4
45°	0,3
90°	0,0

Fuente: Radiowave Propagation in Satellite Communications Autor Louis J. Hipólito

## 1.6 PÉRDIDAS POR LINEA DE TRANSMISION

**1.6.1 Pérdidas por línea de transmisión en la Estación:** son las pérdidas de energía relacionadas con la resistencia de los conductores y la conductancia de los dieléctricos del cable coaxial. Dependen directamente de la frecuencia de trabajo, pues cuando ésta aumenta también lo hace la resistencia debido al efecto de Joule.

Por lo tanto, es importante escoger un cable de buena calidad que presente pocas pérdidas en las dos bandas de frecuencia. Los fabricantes de radios (Kenwood, Yaesu)<sup>5</sup> recomiendan los cables que se muestran en el Cuadro 4. Además, se debe tener en cuenta que la impedancia característica del cable tenga la misma impedancia de salida del radio (50Ω).

Cuadro 4. Pérdidas en decibeles de los cables por cada 30m.

Tipo de cable	Pérdida (dB): 144 MHz	Pérdida (dB): 430 MHz
RG-58 <sup>a</sup>	6.5	>10
RG-58 Foam	4.7	8
RG-213	3.0	5.9
RG-8 Foam	2.0	3.7
Belden 9913	1.5	2.9
Times Microwave LMR-400	1.5	2.6
7/8" Hardline	0.7	1.3

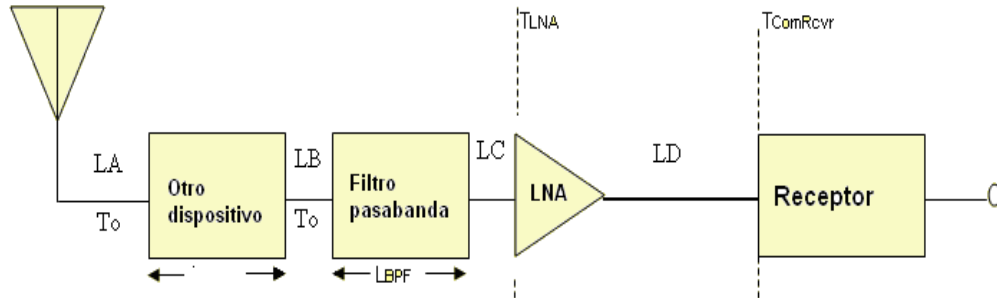
Fuente: Manual de instrucciones Yaesu FT-7800 pág. 7

En la estación terrena se utiliza el cable LMR-400 con coeficiente de pérdida de 1.5dB/30m para 144MHz y 2.6dB/30m para 430MHz.

<sup>5</sup> Manual de instrucciones Yaesu FT-7800 página 7.

Para calcular las pérdidas es necesario determinar la longitud máxima de los cables que interconectan cada uno de los equipos de comunicaciones como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Diagrama de interconexión de los equipos.



Donde:

LA=Línea de transmisión que conecta la antena con un dispositivo (conmutador coaxial o un filtro)

LB=Línea de transmisión que conecta algún dispositivo con el filtro pasabanda.

LC= Línea de transmisión que conecta el filtro con el LNA.

LD= Línea de transmisión que conecta LNA con el transreceptor.

Luego de tener definidas las longitudes, se multiplican por el coeficiente de pérdida y se obtienen las pérdidas presentadas en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Pérdidas por línea de transmisión para las frecuencias de subida y bajada

Distancia	L <sub>línea_bajada</sub> (dB)	L <sub>línea_subida</sub> (dB)
LA = 0.20 m	0.017	0.010
LB = 0.10 m	0.009	0.005
LC= 0.20 m	0.017	0.010
LD = 40.0 m	3.470	2.000
<i>Total=</i>	<b>3.513</b>	<b>2.025</b>

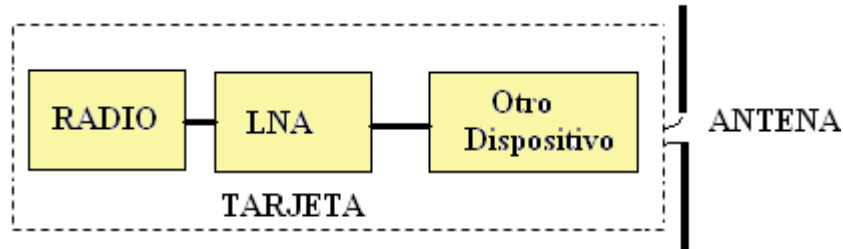
**1.6.2 Pérdidas por conectores:** estas se incluyen como parte de las pérdidas por línea de transmisión, comúnmente un solo conector tiene una pérdida de 0.05dB. En el Cuadro 6 se muestran las pérdidas por conector.

Cuadro 6. Pérdida por conectores.

	N. conectores	Pérdida
L <sub>con_bajada</sub> (X 0.05 dB/con)	6	0.3 dB
L <sub>con_subida</sub> (X 0.05dB/con)	6	0.3 dB

**1.6.3 Pérdidas por línea de transmisión en el satélite:** las pérdidas por línea de transmisión en satélites de radioaficionados y Cubesat son cercanas a cero, ya que el sistema de comunicaciones que tiene a bordo viene integrado en una sola tarjeta y los terminales de la antena (generalmente un dipolo) son soldados directamente o conectados a través de una línea de transmisión que no supera los 10 cm. Los resultados se muestran en el Cuadro 7.

Figura 4. Sistema de comunicaciones del satélite.



Cuadro 7. Pérdida por línea de transmisión para las frecuencias de subida y bajada

Distancia	$L_{\text{línea\_bajada}}$	$L_{\text{línea\_subida}}$
0.10 m	0.009 dB	0.005 dB

## 1.7 PÉRDIDA POR INSERCIÓN DE FILTRO Y LNA

Este tipo de pérdida (ver Cuadro 8) se produce cuando se insertan dispositivos de acondicionamiento como filtros y amplificadores de señal, aunque en teoría no deberían tener ningún efecto sobre la misma, contienen elementos como resistencias, bobinas y circuitos que producen pérdidas.

Cuadro 8. Pérdidas por inserción del filtro y LNA

	Pérdida
$L_{\text{FPB\_subida}}$	0.3 dB
$L_{\text{FPB\_bajada}}$	1 dB

## 1.8 CÁLCULO DE AMPLIFICADOR DE BAJO RUIDO - LNA

El amplificador de bajo ruido (LNA) tiene como función adecuar y amplificar los pequeños niveles de señal RF recibida por las antenas. Se pueden considerar como filtros activos, ya que amplifican la señal RF entre los límites de frecuencia de una banda seleccionada. Usualmente los LNA se instalan en los sistemas de comunicaciones en el enlace de bajada, por presentar bajos niveles de potencia.

Para calcular el LNA es necesario conocer la sensibilidad del radio con el squelch cerrado y las condiciones extremas para establecer un enlace, como: potencia de transmisión más baja

de los satélites, ganancia de las antenas relativamente baja, distancia crítica, pérdidas y ganancias del sistema.

$$LNA = \frac{P_s \text{ LNA}}{P_e \text{ LNA}} \quad \text{Ec. 1.8}$$

$P_s \text{ LNA}$ : Potencia salida LNA

$P_e \text{ LNA}$ : Potencia entrada LNA

La potencia de entrada del LNA ( $P_e \text{ LNA}$ ) se puede calcular a partir de la ecuación 1.5

$$P_e \text{ LNA} = P_t + G_t + G_r - L_p - L_{pol} - L_{llu} - L_{apun} - L_{atmos} - L_{linea\_A} - L_{linea\_B} - L_{linea\_C}$$

Donde:

$$P_t = 100\text{mW} = -10\text{dBW}$$

$$G_t = 1\text{dB}$$

$$G_r = 10\text{dBi}$$

$$L_p = 155.63 \text{ dB}$$

$$L_{pol} = 3\text{dB}$$

$$L_{llu} = 0\text{dB}$$

$$L_{apun} = 1\text{dB}$$

$$L_{atmos} = 2.1 \text{ dB}$$

$$L_{linea\_A} = 0.017\text{dB}$$

$$L_{linea\_B} = 0.009 \text{ dB}$$

$$L_{linea\_C} = 0.017 \text{ dB}$$

$$P_e \text{ LNA} = -160.443\text{dBW}$$

$$P_s \text{ LNA} = \text{Potencia\_recibida\_Radio} - L_{linea\_C}$$

Los valores de sensibilidad e impedancia fueron tomados del manual de instrucciones del radio Kenwood TM-700 páginas E-80 y E-81

$$\begin{aligned} \text{Potencia\_recibida\_Radio} &= (\text{sensibilidad}^2 / Z_o) \\ &= (0.16 \mu\text{V})^2 / 50 \text{ Ohms} \\ &= 5.12 \times 10^{-16} \text{ W} \\ &= -152.907 \text{ dBW} \end{aligned}$$

$$P_s \text{ LNA} = -152.907 \text{ dBW} + 3.47\text{dB}$$

$$P_s \text{ LNA} = -149.437 \text{ dBW}$$

$$LNA = -149.437 \text{ dBW} - (-160.443\text{dBW})$$

$$LNA = \mathbf{11.006 \text{ dB}}$$

El amplificador de bajo ruido LNA que se utilizará en la estación terrena debe tener una ganancia mayor que la calculada, para disponer de un margen de tolerancia, por lo tanto se sugiere un **LNA= 15dB**.

## 1.9 SISTEMA DE TEMPERATURA

En el sistema de temperatura de ruido se estudian los aportes de temperatura generados por cada uno de los componentes del sistema receptor, tanto de la Estación terrena como

del Satélite. Aquí se deben considerar algunos elementos que no fueron tenidos en cuenta en los anteriores cálculos del enlace<sup>6</sup>.

**1.9.1 Sistema de temperatura en la Estación:** la temperatura de ruido de la Estación relaciona los aportes de temperatura de los elementos que la componen, como las temperaturas de la antena ( $T_a$ ), de la línea de transmisión ( $T_{Linea}$ ), del radio ( $T_{Radio}$ ), del amplificador de bajo ruido ( $T_{LNA}$ ) y la temperatura ambiente ( $T_o$ ), también depende del coeficiente de línea ( $\alpha$ ), la ganancia del LNA y la distancia LD. La temperatura de ruido de la Estación viene dada por la ecuación 1.9

$$T_s = (\alpha) T_a + (1-\alpha)T_o + T_{LNA} + T_{Radio}/(G_{LNA}/LD) \quad \text{Ec. 1.9}$$

**1.9.1.1 Temperatura de la antena ( $T_a$ ):** cuando se apuntan las antenas de la Estación hacia el Espacio exterior son afectadas por dos componentes de temperatura: la temperatura de ruido galáctico y la temperatura de ruido terrestre.

$$T_a = T. \text{Galaxia} + T. \text{Fuentes Tierra.} \quad \text{Ec. 1.10}$$

- **La temperatura de ruido galáctico:** está en función de la frecuencia de trabajo y se calcula para las dos temperaturas (fría y caliente).

$$\text{Temp. Fría del ruido Galaxia} = 80 * ((F/1000)/0,25)^{-2,75} + 2,7 \quad \text{Ec. 1.11}$$

$$\text{Temp. Caliente del ruido Galaxia} = 380 * ((F/1000)/0,25)^{-2,75} + 2,7 \quad \text{Ec. 1.12}$$

Remplazando  $F=438\text{MHz}$  en las ecuaciones 1.9 y 1.10.

$$\text{Temp. Fría del ruido Galaxia} = 80 * ((438/1000)/0,25)^{-2,75} + 2,7 = \mathbf{20^\circ K}$$

$$\text{Temp. Caliente del ruido Galaxia} = 380 * ((438/1000)/0,25)^{-2,75} + 2,7 = \mathbf{84^\circ K}$$

- **La temperatura de ruido terrestre:** depende de la potencia de la temperatura estimada teniendo en cuenta las fuentes de ruido cercano a la Estación, como los computadores, la red eléctricas, los aparatos de aire acondicionado entre otros. La potencia estimada para campus universitarios es de  $-132.4\text{dBm}$ . El ancho de banda es de  $10\text{KHz}$ .

$$T. \text{Fuentes Tierra} = 10^{((T_{\text{esti}}+198,6-10*\text{Log}(BW*1000))/10)} \quad \text{Ec. 1.13}$$

Remplazando  $T_{\text{esti}} = -132.4\text{dBm}$ ,  $BW=10\text{KHz}$

$$T. \text{Fuentes Tierra} = 10^{((-132+198,6-10*\text{Log}(10*1000))/10)} = \mathbf{417^\circ K}$$

---

<sup>6</sup> Tesis “Diseño del sistema de comunicaciones de la estación terrena sede Neiva CUBESAT UD” Autores: Diego García Ramos y Hamilton Rivera Pérez.

**1.9.1.2 Coeficiente de línea  $\alpha$ :** es el coeficiente de transmisión de cable y depende de las pérdidas por línea de transmisión del cable.

$$\alpha = 10^{-(L_{\text{línea}}/10)} \quad \text{Ec. 1.14}$$

$L_{\text{línea}}$  : son las pérdidas por línea de transmisión del enlace de bajada, ver Cuadro 5.

$$L_{\text{línea}} = 3.513 \text{ dB}$$

$$\alpha = 10^{-(3.513/10)} = \mathbf{0.4453}$$

**1.9.1.3 Temperatura de ruido de LNA ( $T_{\text{LNA}}$ ):** se calcula a partir de la Figura de ruido NF dada por el fabricante del dispositivo.

$$T = T_0 [10^{(NF_{\text{dB}}/10)} - 1] \quad \text{Ec. 1.15}$$

Un valor común para la Figura de ruido es de 4dB a temperatura de ambiente de 300°K, reemplazando en la ecuación 1.15

$$T = 300^\circ\text{K} [10^{(4/10)} - 1] = \mathbf{453.5^\circ\text{K}}$$

**1.9.1.4 Temperatura de ruido del radio ( $T_{\text{Radio}}$ ):** está en función de la Figura de ruido NF y se calcula a partir de la ecuación 1.15

La Figura de ruido para el radio utilizado es de  $NF_{\text{dB}} = 6.5\text{dB}$  a  $T_0 = 300^\circ\text{K}$ , reemplazando en la ecuación 1.15

$$T_{\text{Radio}} = 300^\circ\text{K} [10^{(6.5/10)} - 1] = \mathbf{1040^\circ\text{K}}$$

Una vez que se tienen los valores de las componentes, se reemplazan en la ecuación 1.9

$$\begin{aligned} T_a &= 521 \text{ }^\circ\text{K} \\ T_{\text{LNA}} &= 453.5^\circ\text{K} \\ T_{\text{Radio}} &= 1040^\circ\text{K} \\ T_0 &= 300 \text{ }^\circ\text{K} \\ G_{\text{LNA}} &= 15 \text{ dB} = 31.6 \\ \alpha &= 0.4453 \\ LD &= 40 \text{ m} \end{aligned}$$

Entonces la temperatura de ruido de la Estación es:

$$T_s = (0.4453) * 521 \text{ }^\circ\text{K} + (1 - 0.4453) 300 \text{ }^\circ\text{K} + 453.5^\circ\text{K} + 1040^\circ\text{K} / (31.6/40 \text{ m}) = \mathbf{2168.36^\circ\text{K}}$$

**1.9.2 Sistema de temperatura en el satélite:** para hallar la temperatura equivalente en el satélite se utiliza la ecuación 1.9, pero el término LD es anulado.



$$T_s = (\alpha) T_a + (1-\alpha)T_o + T_{LNA} + T_{Radio}/G_{LNA} \quad \text{Ec. 1.16}$$

**1.9.2.1 Temperatura de la antena (Ta):** cuando se apuntan las antenas de la Estación hacia el espacio exterior son afectadas por dos componentes de temperatura: la temperatura de ruido galáctico y la temperatura de ruido terrestre.

$$T_a = 10\% T. \text{Galaxia} + 90\%T. \text{Tierra} \quad \text{Ec. 1.17}$$

$$T_a = (0.1)(3^\circ\text{K}) + (0.9)(300^\circ\text{K}) = \mathbf{270^\circ\text{K}}$$

**1.9.2.2 Coeficiente de línea  $\alpha$ :** es el coeficiente de transmisión de cable y depende de la pérdida por línea de transmisión del cable.

$$\alpha = 10^{-((LA/10)+(LB/10)+(LC/10)+(LBPF/10)+(Ltro/10))}$$

$$\alpha = 10^{-0} = \mathbf{1}$$

**1.9.2.3 Temperatura de ruido de LNA ( $T_{LNA}$ ):** se calcula a partir de la Figura de ruido NF. Este dispositivo usualmente no se encuentra en los satélites radioaficionados ni Cubesat.

$$NF_{dB} = 0\text{dB}$$

$$T_o = 270^\circ\text{K}$$

$$T = 300^\circ\text{K} [10^{(0/10)} - 1] = \mathbf{0^\circ\text{K}}$$

**1.9.2.4 Temperatura de ruido del radio ( $T_{Radio}$ ):** está en función de la Figura de ruido NF y se calcula a partir de la Ec. 1.15

$$NF_{dB} = 4\text{dB}$$

$$T_o = 270^\circ\text{K}$$

$$T_{Radio} = 270^\circ\text{K} [10^{(4/10)} - 1] = \mathbf{408^\circ\text{K}}$$

El cálculo de la temperatura de ruido en el satélite, a partir de la ecuación 1.16 es:

$$T_a = 270^\circ\text{K}$$

$$T_{LNA} = 0^\circ\text{K}$$

$$T_{Radio} = 408^\circ\text{K}$$

$$T_o = 270^\circ\text{K}$$

$$G_{LNA} = 0\text{dB} = 1$$

$$\alpha = 1$$

Entonces la temperatura de ruido del satélite es:

$$T_s = (1) * 270^\circ\text{K} + (1-1) 270^\circ\text{K} + 0^\circ\text{K} + 408^\circ\text{K} / 1 = \mathbf{678^\circ\text{K}}$$

Cuadro 9. Resumen de datos

Concepto	Símbolo	Valor
Ancho de Banda	BW	10KHz
Potencia Satélite	$P_{t_{satélite}}$	$100mW = -10dBW$
Potencia Estación	$P_{t_{estación}}$	$5W = 7dBW$
<b>Pérdidas:</b>		
Pérdida polarización	$L_{pol}$	3dB
Pérdida línea satélite subida	$L_{línea Subida Satélite}$	0.005dB
Pérdida línea Estación subida	$L_{línea Subida Estacion}$	2.025dB
Pérdida línea satélite bajada	$L_{línea Bajada Satélite}$	0.009dB
Pérdida línea Estación bajada	$L_{línea Bajada Estacion}$	3.513dB
Perdida Esp. libre Subida	$L_{pSubida}$	146.08dB
Perdida Esp. libre Bajada	$L_{pBajada}$	155.63dB
Perdida Lluvia	$L_{llu}$	0dB
Perdida Apuntamiento	$L_{apun}$	1dB
Perdida Atmosférica	$L_{atmos}$	2.1dB
<b>Ganancias:</b>		
Ganancia Antena Satélite	$G_{ant Satélite}$	1dBi
Ganancia Antena Estación	$G_{ant Estacion}$	15dBi
Ganancia LNA	LNA	15dB
<b>Temperatura:</b>		
Temperatura Estación	$T_{s\_Estacion}$	2168.36°K
Temperatura Satélite	$T_{s Satélite}$	678°K

## 1.10 PARAMETROS DEL ENLACE

Una vez se tienen cada uno de los datos de las pérdidas y ganancias del enlace de subida y bajada respectivamente, se pueden calcular los parámetros que caracterizan el radioenlace, como: la potencia crítica recibida ( $P_R$ ), la potencia irradiada isotrópica (PIRE), la Figura de mérito ( $G/T$ ), la relación señal a ruido ( $S/N$ ) y la tasa de error de bit ( $BER$ ).

**1.10.1 Potencia recibida ( $P_R$ ):** se calcula a partir de la ecuación 1.5, reemplazando datos de las pérdidas y ganancias, mas la ganancia del LNA.

*Potencia recibida en la Estación*

$$P_{R\_Estacion} = -10dBW + 1dB + 16dBi - 155.63dB - 3dB - 1dB - 2.1dB - 3.513dB - 0.009dB + 15dB$$

$$P_{R\_Estacion} = \mathbf{-143.252dBW}$$

*Potencia recibida en el Satélite*

$$P_{R\_Satélite} = 7\text{dBW} + 1\text{dB} + 10\text{dBi} - 146.08\text{dB} - 3\text{dB} - 1\text{dB} - 2.1\text{dB} - 2.025\text{dB} - 0.005\text{dB}$$

$$P_R = -136.21 \text{ dBW}$$

**1.10.2 Potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE):** este parámetro indica la potencia que irradia el sistema transmisor si hipotéticamente se cambiara la antena directiva por un radiador isotrópico. Se calcula multiplicando la ganancia de la antena ( $G_t$ ) por la potencia efectiva transmitida ( $P_{te}$  = potencia menos pérdida en el transmisor). Se calcula a partir de la ecuación 1.18

$$PIRE = P_{te} * G_t \quad \text{Ec. 1.18}$$

*PIRE en la Estación:*

$$PIRE_{Estacion} = (P_{t_{estacion}} - L_{linea\_Subida\_Estacion} - L_{filtroLNA}) + G_{ant\_Estacion}$$

$$PIRE_{Estacion} = (7\text{dBW} - 2.025\text{dB} - 1\text{dB}) + 10\text{dBi} = 13.975\text{dBW}$$

*PIRE en el Satélite:*

$$PIRE_{Satélite} = (P_{t_{satélite}} - L_{linea\_Bajada\_Satélite}) + G_{ant\_Satélite}$$

$$PIRE_{Satélite} = (-10\text{dBW} - 0.005\text{dB}) + 1\text{dBi} = -9.005\text{dBW}$$

**1.10.3 Figura de merito G/T:** es el parámetro que indica el grado de desempeño de la antena receptora, se establece mediante la relación que hay entre la ganancia de la antena y la temperatura. Se calcula a partir de la ecuación 1.19

$$G/T = G_{dB} - T_{dB} \quad \text{Ec. 1.19}$$

*G/T en la Estación:*

$$G/T = (G_{ant\_Estacion} + LNA - L_{linea\_Bajada\_Estacion} - L_{filtroLNA}) - 10 * \log(Ts_{Estacion})$$

$$G/T = (16\text{dBi} + 15\text{dB} - 2.025\text{dB}) - 10 * \log(2168.36) = -4.38 \text{ dB/K}$$

*G/T en la Satélite:*

$$G/T_{Satélite} = (P_{t_{satélite}} - L_{linea\_Subida\_Satélite}) - 10 * \log(Ts_{Satélite})$$

$$G/T_{Satélite} = (1\text{dBi} - 0.009\text{dB}) - 10 * \log(678) = -27.32 \text{ dB/K}$$

**1.10.4 Nivel de potencia isotrópica recibida (NPIR):** es el nivel de potencia recibida por una antena ideal isotrópica. Se calcula a partir de la ecuación 1.20

$$NPIR = PIRE - L_p - L_{pol} - L_{llu} - L_{apun} - L_{atmos} \quad \text{Ec. 1.20}$$

*NPIR en la Estación:*

$$NPIR_{Estacion} = -9.005\text{dBW} - 155.63\text{dB} - 3\text{dB} - 1\text{dB} - 2.1\text{dB} - 3.513\text{dB} - 0.009\text{dB}$$

$$NPIR_{Estacion} = -174.257\text{dBW}$$

*NPIR en el Satélite:*

$$\begin{aligned} \text{NPIR}_{\text{Satélite}} &= 13.975\text{dBW} - 146.08\text{dB} - 3\text{dB} - 1\text{dB} - 2.1\text{dB} - 2.025\text{dB} - 0.005\text{dB} \\ \text{NPIR}_{\text{Satélite}} &= \mathbf{-140.235\text{dBW}} \end{aligned}$$

**1.10.5 Densidad de potencia de la relación señal a ruido (S/No):** indica las intensidades relativas de la señal y el ruido en un sistema de comunicaciones tomando como ancho de banda  $BW=1\text{Hz}$ .

$$S/No = \text{NPIR} + G/T + 228.60 \text{ (Boltzmann)} \quad \text{Ec. 1.21}$$

*S/No en la Estación:*

$$S/No_{\text{Estacion}} = -174.257 + (-4.38\text{dB/K}) + 228.60 = \mathbf{49.963 \text{ dBHz}}$$

*S/No en el Satélite:*

$$S/No_{\text{Satélite}} = -140.235 + (-27.32\text{dB/K}) + 228.60 = \mathbf{61.043\text{dBHz}}$$

**1.10.6 Energía de bit (Eb/No):** es la relación que indica la calidad de una comunicación digital, depende de la velocidad de transmisión (V), y de la densidad de la relación señal a ruido (S/No).

$$Eb/No = S/No - 10 \cdot \log(V) \quad \text{Ec. 1.22}$$

Donde  $V = 1200 \text{ bps}$

*Eb/No en la Estación:*

$$Eb/No_{\text{Estacion}} = 49.963\text{dBHz} - 10 \cdot \log(1200) = \mathbf{19.17 \text{ dB}}$$

*Eb/No en la Satélite:*

$$Eb/No_{\text{Satélite}} = 61.043\text{dBHz} - 10 \cdot \log(1200) = \mathbf{30.25 \text{ dB}}$$

**1.10.7 Cálculo de potencia del ruido (P<sub>N</sub>):** expresa la potencia de ruido del sistema, tanto en la Estación como en el satélite y depende de la temperatura del sistema (T<sub>s</sub>) y del ancho de banda utilizado (BW). Está dada por la fórmula de Jonson (ecuación 1.23):

$$P_N = k \cdot T_s \cdot BW \quad \text{Ec. 1.23}$$

K: Constante de Boltzmann =  $1.38062 \times 10^{-23} \text{ J/K} = -228.6 \text{ dBW/K/Hz}$

*P<sub>N</sub> en la Estación Terrena:*

$$\begin{aligned} P_{N_{\text{Estacion}}} &= -228.6\text{dBW/K/Hz} + 10 \text{ Log}(2168.36^\circ\text{K}) + 10 \text{ Log}(10 \times 10^3 \text{ Hz}) \\ P_{N_{\text{Estacion}}} &= \mathbf{-155.24 \text{ dBW/K/Hz}} \end{aligned}$$

*P<sub>N</sub> en el Satélite:*

$$\begin{aligned} P_{N_{\text{Satélite}}} &= -228.6\text{dBW/K/Hz} + 10 \text{ Log}(678^\circ\text{K}) + 10 \text{ Log}(10 \times 10^3 \text{ Hz}) \\ P_{N_{\text{Satélite}}} &= \mathbf{-160.28 \text{ dBW/K/Hz}} \end{aligned}$$

**1.10.8 Relación señal a ruido (S/N):** es una medida más realista para caracterizar un enlace que la densidad S/No (ver Ec. 1.21), ya que tiene en cuenta la potencia de ruido que se distribuye por todo el ancho de banda (BW=10kHz) de la señal.

$$S/N = P_r - P_N \quad \text{Ec. 1.24}$$

*S/N en la Estación:*

$$S/N_{\text{Estacion}} = -143.252 \text{ dBW} - (-155.24 \text{ dBW/K/Hz}) = \mathbf{11.98 \text{ dB}}$$

*S/N en el Satélite:*

$$S/N_{\text{Satélite}} = -136.21 \text{ dBW} - (-160.28 \text{ dBW/K/Hz}) = \mathbf{24.08 \text{ dB}}$$

A continuación se muestran dos cuadros que resumen los parámetros que caracterizan los enlaces de subida y bajada:

Cuadro 10. Resumen cálculo del enlace de subida.

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
<b><i>Estación Terrena:</i></b>			
Potencia transmisor Estación	$P_{t_{\text{estación}}}$	7	dBW
Pérdida línea Estación subida	$L_{\text{línea Subida Estacion}}$	3.513	dB
Ganancia Antena Estación	$G_{\text{ant Estacion}}$	15	dB
Pot. Radiada isotrópica	$PIRE_{\text{Estacion}}$	13.975	dBW
<b><i>Pérdidas de camino:</i></b>			
Pérdida polarización	$L_{\text{pol}}$	3	dB
Pérdida Esp. libre Subida	$L_{p_{\text{Subida}}}$	146.08	dB
Pérdida Lluvia	$L_{\text{llu}}$	0	dB
Pérdida Apuntamiento	$L_{\text{apun}}$	1	dB
Pérdida Atmosférica	$L_{\text{atmos}}$	2.1	dB
<b><i>Satélite:</i></b>			
Nivel Pot. isotrópica recibida	$NPIR_{\text{Satélite}}$	-140.235	dBW
Ganancia Antena Satélite	$G_{\text{ant Satélite}}$	1	dB
Pérdida línea satélite subida	$L_{\text{línea Subida Satélite}}$	0.009	dB
Potencia recibida	$P_{R_{\text{satélite}}}$	-143.252	dBW
Temperatura Efectiva satélite	$T_{s_{\text{Satélite}}}$	678	°K
Figura de merito	$G/T_{\text{Satélite}}$	-27.32	dB/K
Densidad potencia- ruido	$S/No_{\text{Sat}}$	61.043	dBHz
Energía de bit	$E_b/No_{\text{Satélite}}$	30.25	dB

Potencia de ruido	$P_{N \text{ Satélite}}$	-160.28	dBW/K/Hz
Relación señal a ruido	$S/N \text{ Satélite}$	24.08	dB

Cuadro 11. Resumen cálculo del enlace de bajada.

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
<b><i>Satélite:</i></b>			
Potencia transmisor Satélite	$P_{t \text{ Satélite}}$	-10	dBW
Pérdida línea Estación subida	$L_{\text{línea Bajada Satélite}}$	0.005	dB
Ganancia Antena Satélite	$G_{\text{ant Satélite}}$	1	dB
Pot. Radiada isotropica	$PIRE_{\text{Satélite}}$	-9.005	dBW
<b><i>Pérdidas de camino:</i></b>			
Pérdida polarización	$L_{\text{pol}}$	3	dB
Pérdida Esp. libre Bajada	$L_{\text{p Bajada}}$	155.63	dB
Pérdida Lluvia	$L_{\text{llu}}$	0	dB
Pérdida Apuntamiento	$L_{\text{apun}}$	1	dB
Pérdida Atmosférica	$L_{\text{atmos}}$	2.1	dB
<b><i>Estación:</i></b>			
Nivel Pot. isotrópica recibida	$NPIR_{\text{Estacion}}$	-174.257	dBW
Ganancia Antena Estación	$G_{\text{ant Estacion}}$	15	dB
Ganancia LNA	LNA	15	dB
Pérdida línea bajada Estación	$L_{\text{línea Bajada Estacion}}$	3.513	dB
Potencia recibida Estación	$P_{R \text{ Estacion}}$	-143.252	dBW
Temperatura Efectiva Estación	$T_{s \text{ Estacion}}$	2168.36	°K
Figura de merito Estación	$G/T_{\text{Estacion}}$	-4.38	dB/K
Densidad potencia- ruido	$S/No_{\text{Estacion}}$	49.963	dBHz
Energía de bit	$E_b/No_{\text{Estacion}}$	19.17	dB
Potencia de ruido	$P_{N \text{ Estacion}}$	-155.24	dBW/K/Hz
Relación señal a ruido	$S/N_{\text{Estacion}}$	11.98	dB

## 2. ESTADO DE LA ESTACION

En este capítulo se describen las características, funcionamiento, recomendaciones, ventajas y desventajas de cada uno de los instrumentos, herramientas y dispositivos que conforman la Estación Terrena USCO. A continuación se listan las características y especificaciones generales de la Estación, y los dispositivos y software que la componen:

Cuadro 12. Especificaciones de la Estación USCO

<b>Nombre de la Estación Terrena</b>	<b>USCO</b>
Universidad	Surcolombiana
Ciudad	Neiva
País	Colombia
Altitud	2.9437 N
Longitud	75.3006 W
Frecuencias de Operación	144-146 MHz, 432-438 MHz
Antenas (2m – VHF)	Yagi diseñadas y comerciales (Cushcraft 13B2)
Antenas (70cm – UHF)	Yagi diseñadas y comerciales (Cushcraft A44911S)
Rotor de la antena	Yaesu G-5500
Control Rotor	Yaesu G-5500
Interface PC-Control rotor	Yaesu GS-232B, ICU G-5500 (Desarrollo USCO)
Radios	Kenwood TM-D700, Yaesu FT-7800
Radios auxiliares	Yaesu VX-6R, Yaesu VX-3R
Vatímetro & SWR	Diamond SX-400
GPS	Garmin Etrex
UPS	APC 1 KVA
Fuente de corriente	Diamond GZV4000

Analizador de espectro	Motorola serie R2600
Cable coaxial	LMR-400
Cable de control	Multipar de 10 hilos.
Amplificador de bajo ruido LNA (70cm)	SP-700 (Recomendado)
Conmutador coaxial	SSB AS-304 DC - 600MHz (Recomendado)
PC1 , PC2 y PC3	Procesador Intel® Core™ 2 duo, 2.19 GHz , Memoria DDR2 1GB
Sistema Operativo	Windows XP
Software de predicción de efemérides	WinOrbit WxTrack Orbitron Jtrack AMSAT
Software tiempo real	WinOrbit WxTrack Orbitron ICU G5500 2.0 PROET (Aplicación en Labview)
Software post-pasada	PROET (Aplicación en Labview)
Software TNC	PROET (Aplicación en Labview)

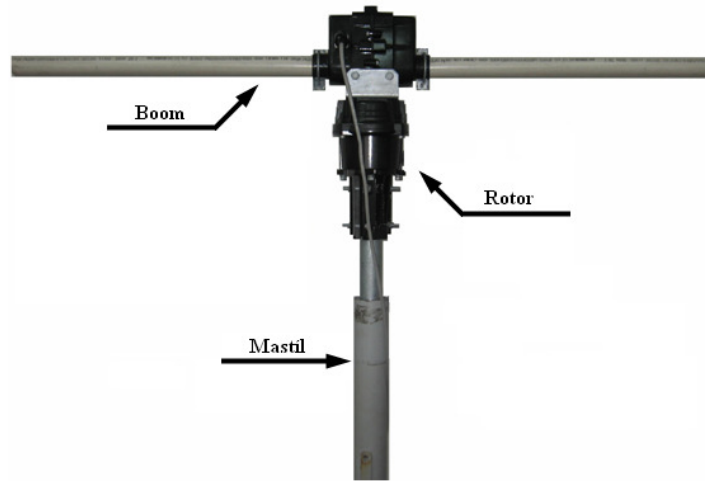
## 2.1 DESCRIPCION DEL HARDWARE

A continuación se explica el funcionamiento, utilización, ventajas y desventajas de los dispositivos, instrumentos y estructuras que conforman la parte física de la Estación Terrena.

**2.1.1 Torre:** actualmente la torre/mástil se encuentra sobre la terraza del bloque de ingeniería de la Universidad Surcolombiana, a una altura aproximada de 25m del suelo. El mástil es un tubo galvanizado de 3” de diámetro que sostiene el rotor Yaesu G-5500, al cual se atornilla un **boom** (tubo de 2 ½ “) que soporta las antenas.



Figura 5. Mástil, rotor y boom



**2.1.2 Antenas:** se consideran como uno de los dispositivos más importantes para establecer la comunicación satelital, ya que sus características eléctricas determinan la recepción exitosa y transmisión de señales de radio. Por este motivo se han simulado, fabricado y probado diversas antenas, entre las que se encuentran las antenas comerciales adquiridas, las diseñadas en los estudios previos<sup>7</sup> y las antenas diseñadas en el desarrollo de este proyecto. A continuación se describen los parámetros más relevantes:

Cuadro 13. Características de las antenas.

ANTENA	CARACTERISTICAS
COMERCIAL (A44911S)	Polarización: Lineal Banda 440-450 MHz Ganancia: 15.6dBi Relación Adelante-atrás: 20dB Ancho de haz $-3_{dB}$ : $48^{\circ}$
COMERCIAL (13B2)	Polarización: cruzada Banda 144 – 148 MHz Ganancia: 18.2dBi Relación Adelante-atrás: 26dB Ancho de haz $-3_{dB}$ : $36^{\circ}$
DISEÑADA (2m) Dipolo	Polarización: Lineal Banda 144 – 148 MHz Ganancia: 2,4 dBi
DISEÑADA (70cm)	Polarización: Lineal

<sup>7</sup> Tesis “Diseño de un sistema de antenas para transmisión y recepción de datos en una estación terrena CUBESAT UD – USCO” Autores: ALEX ANDREY LAVAO PASTRANA, MIGUEL ANTONIO PLAZAS MUÑOZ.

Yagi con elementos incrustados en el boom	Banda 440 – 450 MHz Ganancia: 12 dBi Relación Adelante-atrás: 19dB Ancho de haz $-3_{dB}$ : 30°
DISEÑADA (70cm) Yagi con elementos sobre el boom	Polarización: Lineal Banda 440 – 450 MHz Ganancia: 11.5 dBi Relación Adelante-atrás: 121dB Ancho de haz $-3_{dB}$ : 35°

**2.1.3 Radios:** a continuación se describe el funcionamiento, ventajas y desventajas de los radios que se han utilizado en la Estación.

**2.1.3.1 Kenwood TM – D700:** este transceptor (ver Figura 6) trabaja en las bandas de radioaficionados 144MHz (VHF) y 438MHz (UHF). Tiene tres niveles de potencia: bajo(5W), medio(10W) y alto(50W para la banda de VHF y 40W para la banda de UHF).

Figura 6. Radio Kenwood TM – D700



Fuente: <http://aprs.qrz.ru/hard/tm-d700/tm-d700.php>

Además tiene las siguientes funciones:

- CDCSS (Sistema de Silenciamiento Codificado de Tonos Continuos)
- DCS (Silenciamiento Codificado Digital)
- TNC (Nodo Terminal Controlado)
- ARPS (Sistema de Notificación de Posición/ Paquetes Automática)
- SSTV(Sistema Exploración Lenta de Televisión)
- Sky Command (Para controlar un transceptor **KENWOOD** HF en un lugar remoto)

El mínimo paso en frecuencia es de 5KHz, una desventaja para seleccionar las frecuencias de corrimiento Doppler entregadas por el software de predicción que son del orden de centenas de Hz, imposibilitando la compensación continúa de frecuencia para corregir el corrimiento por efecto Doppler. En muchas Estaciones Terrenas para Cubesat disponen de radios como el ICOM 910 y Yaesu FT-870 que tienen un mínimo paso de 10Hz, ideal para corregir el efecto Doppler.

El radio Kenwood D700 permite la recepción de frecuencias desviadas por Doppler hasta +/- 6KHz, ya que tiene una selectividad de 12KHz a -6 dB y 28KHz a -40 dB con un factor de forma igual a 2.5, pero esto no indica que se haya hecho compensación por Doppler, porque la señal recibida no es correctamente sintonizada, lo que produce pérdidas en potencia.

Tiene un TNC<sup>8</sup> incorporado que maneja el protocolo AX.25, útil par enviar y recibir paquetes de datos y para tratar formatos de datos soportados por el Sistema de Notificación de Posición/ Paquetes Automática (APRS®). Es capaz de recibir paquetes en una banda al mismo tiempo que recibe audio en otra. Se conecta al PC por medio de un conector RS-232 permitiendo enviar comandos de control para la configuración del radio y del TNC. A continuación se muestran algunos de los comandos mas utilizados:

Cuadro 14. Lista de algunos comandos del radio Kenwood.

Comando	Función
AI 1	Inicializa la comunicación serial; [OFF ON]
FQ [00000000000]	Selecciona la frecuencia de operación,
TNC n	Configura el TNC; n = 0:off, 1:APRS, 2:Packet
PC b,n	Configura la potencia de transmisión ; [A B], n = 0:Alta, 1:media, 2:Baja
BVOL n	Configura el volumen del Beep n=0:off a 7:máximo
AG b,n	Configura el volumen del radio b = [A B], n = 0-3F = off
PS	Configura el encendido [OFF ON] (Solo puede cambiar a apagado)

Fuente: <http://www.qsl.net/k7jar/pages/D700Cmds.html>

Debe tenerse en cuenta que cuando se configure el TNC 1, el radio muestra en el display TNC PKT (Packet) pero el TNC todavía no está habilitado para transmitir y recibir datos; para habilitarlo es necesario enviar el comando adicional TC 0, éste fué el principal inconveniente para la transmisión de datos, pues una de las razones es que el fabricante no suministra la lista de comandos de control remoto del radio. Para dar solución a este problema fue necesario consultar información disponible en foros de radioaficionados.

También es importante aclarar que los comandos de control del radio y el TNC no pueden enviarse de forma simultánea, impidiendo cambiar la frecuencia de trabajo para corregir el efecto Doppler cuando se está en modo TNC (enviar/recibir datos) o viceversa.

<sup>8</sup> Controlador de nodo terminal (TNC), su función es convertir paquetes de datos a tonos de audio y viceversa

**2.1.3.2 Yaesu FT – 7800:** es un transceptor (ver Figura 7) FM de dos Bandas, el cual suministra 50 vatios de potencia de salida en las bandas de aficionados de 144 MHz y 40 vatios, en la banda de 430 MHz

Figura 7. Radio Yaesu FT – 7800R



Fuente: <http://www.hfelectronics.be/Ama/YAESU/FT-7800.htm>

Además tiene las siguientes funciones:

- CDCSS (Sistema de Silenciamiento Codificado de Tonos Continuos)
- DCS (Silenciamiento Codificado Digital)
- WIRESMR (Sistema de Amplificación para repetidores vía Internet)
- APO (Sistema de Apagado Automático)
- ARS(Sistema de Conmutación Automática del Repetidor)
- ARTSMR (Sistema de Transpondedor con Verificación de Distancia Automática), el cual le envía una señal audible al usuario cada vez que éste se aleja del radio de alcance de otra estación también equipada con este tipo de sistema.

Este equipo se ha utilizado para pruebas de transmisión de voz ya que no tiene incorporado TNC, imposibilitando la transmisión de paquetes con el mismo transreceptor, aunque es posible conectar cualquier TNC externo a su puerto mini-DIN.

Además no permite el control remoto de funcionamiento, impidiendo la automatización de sistema de comunicaciones de la Estación Terrena.

Presenta el mismo problema de Kenwood D700, ya que el mínimo paso en frecuencia es de 5KHz, que resulta inadecuado para corregir el corrimiento por efecto Doppler.

**2.1.3.3 Yaesu VX – 3R y VX-6R:** estos radios de mano (Figura 8) , ofrecen recepción en múltiples bandas de FM y AM (MF), pero el VX-3R transmite hasta 5 vatios de potencia en las bandas de 144 MHz (VHF) y 430MHz (UHF).

Figura 8. Radios Yaesu VX – 3R y VX-6R



Fuente: <http://www.rigpix.com/yaesu/vx3r.htm>, <http://www.rigpix.com/yaesu/vx6r.htm>

Mientras que el VX-3R transmite hasta 1.5 vatios de potencia en la banda de 144 MHz (VHF) y 1 vatio en la banda de 430MHz (UHF). Estos radios se utilizan en pruebas de larga distancia para determinar la potencia recibida en la Estación.

**2.1.4 Interface ICU G-5500:** el ICU G-5500 (Figura 9) captura los valores análogos de salida del control del rotor, los procesa y determina la posición de Azimut y Elevación del rotor para enviarlos al PC por medio del puerto USB, además de enviar comandos de control desde el programa ICU G-5500 para controlar la posición del rotor.

Figura 9. ICU G-5500



**2.1.5 Interface GS-232B:** este dispositivo (Figura 10) se encarga de convertir los datos de control enviados desde el PC por medio de un cable serial RS-232 en niveles de voltaje, que luego son enviados al control GS-5500 por medio de un conector DIN.

Figura 10. GS-232B



Fuente: [http://www.proyecto4.com/product\\_info-99\\_108+633.html](http://www.proyecto4.com/product_info-99_108+633.html)

**2.1.6 Rotor GS-5500 y control GS-5500:** el Rotor GS-5500 (Figura 11) se mueve en un rango de 0° a 450° de Azimut y de 0° a 180° de elevación, tiene dos unidades de rotación independiente (Azimut y elevación) y gracias a su construcción es libre de mantenimiento bajo todas las condiciones climáticas.

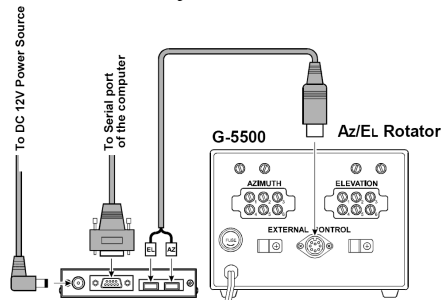
Figura 11. Rotor GS-5500 y control GS-5500



Fuente: [http://www.locuradigital.com/rotores\\_antenas/g5500.htm](http://www.locuradigital.com/rotores_antenas/g5500.htm)

La unidad de control GS-5500 (Figura 11) tiene 4 interruptores para establecer los ángulos de azimut y elevación manualmente, posee un terminal DIN para ser controlado remotamente; tiene dos sockets de salida, uno para elevación y otro para azimut, cada socket con 6 pines enumerados, conectados al rotor a través de un cable que lleva las señales de control (Figura 12).

Figura 12. Conexión del control GS-5500 y la interface GS-232B



Fuente: Manual YAESU GS-5500. Pag 5.

Además se puede calibrar la escala y el voltaje de salida del terminal DIN con dos potenciómetros. Una forma útil de calibrar es conectar el sistema de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 12, luego por medio del Hiperterminal de Windows se envía el comando F2 y el control responde enviando la posición actual del rotor la cual debe ser comparada con los indicadores análogos del control GS-5500, luego se ajusta la escala y el voltaje con los potenciómetros hasta que coincidan los ángulos indicados en el control con los vistos en el PC.

**2.1.7 Vatímetro & SWR Diamond SX-400:** este dispositivo (Figura 13) mide la potencia RF (140MHz -525MHz) directa y reflejada de una señal hasta 200W. Además sirve para medir la relación de onda estacionaria SWR, medida utilizada para determinar el grado de acoplamiento de impedancia entre el radio y la antena. Tiene tres selectores, uno para la potencia (se debe seleccionar la escala apropiada), otro para seleccionar la función (potencia, calibración o SWR) y el otro para escoger que potencia se quiere medir (directa o reflejada).

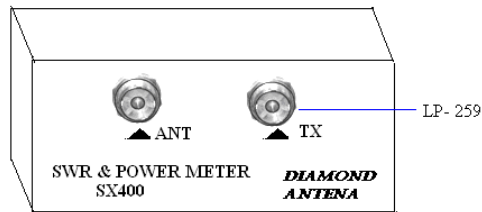
Figura 13. Vatímetro & SWR Diamond SX-400



Fuente: <http://www.hfelectronics.be/Mea/DIAMOND/SX-400.htm>

En la parte trasera tiene dos conectores PL-259, uno que conecta a la antena y otro al radio como se observa en la Figura 14.

Figura 14. Parte trasera del Vatímetro & SWR Diamond SX-400



Antes de medir el SWR es necesario calibrar el dispositivo; para esto debe seleccionar la función CAL, transmitir con el radio y por medio de la perilla CAL ubicar la aguja del indicador análogo sobre la última línea del extremo derecho, luego se escoge la función SWR. Mediciones de SWR mayores de 1,5 indican que hay un desacople significativo de impedancia en el sistema y es peligroso dañar la entrada/salida del radio, pues, la potencia transmitida directa se suma con la potencia reflejada excediendo el nivel de potencia máximo del radio.

**2.1.8 GPS (GARMIN modelo Etrex SUMMIT):** el GPS (Figura 15) es un instrumento que permite determinar la posición de elementos en la superficie terrestre. El error mínimo en ausencia de obstáculos es 5 metros, en otros casos puede ser de unos 15 metros, lo cual no es una cifra representativa considerando las grandes distancias entre la estación terrena y el satélite.

Figura 15. GPS GARMIN Etrex SUMMIT



Fuente: [http://www.ciao.es/opinion\\_images\\_view.php/OpinionId/1301153](http://www.ciao.es/opinion_images_view.php/OpinionId/1301153)

Los GPS GARMIN vienen configurados por defecto con el sistema WGS-84<sup>9</sup> al cual están referenciadas las antenas de la estación terrena con las siguientes coordenadas:

2°56'45.24'' N  
75°18'14.79'' W

Sin embargo, para ubicar la estación terrena con respecto a la cartografía emitida por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) es necesario configurarlo en las coordenadas

---

<sup>9</sup>WGS-84 (World Geodetic System 1984), es un modelo matemático de referencia (datum) que representa la Tierra como un elipsoide formado por las coordenadas geográficas (latitud y longitud) y el centro de esta.

planas<sup>10</sup> que se manejan en Colombia, ya que el sistema del GPS no coincide con esta cartografía. A continuación se muestra el procedimiento.

Menú → Ajuste → Unidades → Formato posición → Parrilla usuario

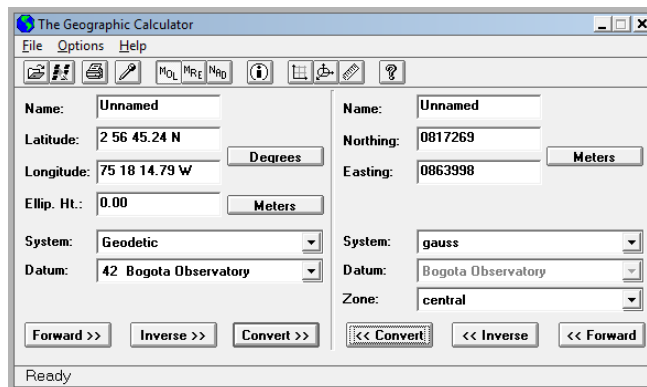
Longitud	74°04'51.3''W
Escala	1000000
Este Falso	1000000 m
Norte Falso	491447.2 m

Datos obtenidos

Posición:	0863998 m	→	2°56'45.24'' N
	0817269 m	→	75°18'14.79'' W
Altura	473 m		

La posición también se determinó utilizando un GPS, perteneciente al programa de Ingeniería Agrícola, el cual está configurado para que las unidades se presentaran en coordenadas planas (metros), por lo cual fue necesario utilizar el software GEOCALC para convertir coordenadas planas a geográficas (ver Figura 16).

Figura 16. Apariencia programa GEOCALC

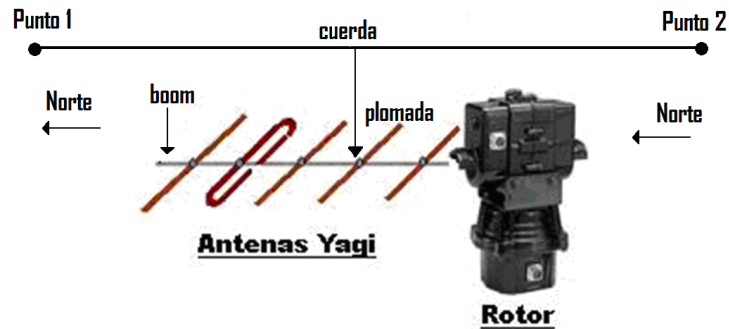


La brújula o compás incorporada en el GPS fué utilizada para alinear el cero del sistema de referencia de la antena (azimut cero) con el norte geográfico de la tierra. Se orienta una línea recta hacia el norte geográfico y el sistema de antenas se ubica de forma paralela apuntando en esa dirección (ver Figura 17).

<sup>10</sup> Las coordenadas planas se basan en un sistema de proyección cartográfica que representa una superficie esférica proyectada sobre un plano, al intentar adaptar una esfera como la tierra a un plano, se generan inconsistencias si el área es grande. En Colombia se solucionó esto estableciendo diversos orígenes por Husos que se extienden 1.5° alrededor del meridiano central.



Figura 17. Método alineación de las antenas con el norte



**2.1.9 Analizador de Espectro:** este instrumento sirve para monitorear y analizar comunicaciones en un rango de frecuencias desde 400 Hz hasta 999.9999 MHz, con una resolución de 100Hz (Figura 18). Esta resolución permite una buena sintonización de frecuencias, lo que facilita hacer un minucioso estudio de interferencias en los ancho de banda escogidos (2m - 70cm).

Figura 18. Analizador de espectro



Fuente: <http://www.motorolaconnection.com/191/207>

El analizador tiene funciones asociadas a los siguientes dispositivos: generador de señales RF, analizador de espectro, generador compensado dúplex, osciloscopio, contador de frecuencia, voltímetro AC/DC, vatímetro de RF, generador de rastreo, codificador/decodificador de señales, medidor de SINAD, analizador de distorsión, entre otras.

El analizador se utilizó como generador de señales de audio, con el objeto de generar tonos que simularan una señal faro, la cual fue decodificada por medio de software. También se utilizó como analizador de espectro para obtener el patrón de radiación de las antenas haciendo mediciones de voltaje y potencia.

Este instrumento permite visualizar señales cercanas a las frecuencias de interés ya que tiene una dispersión mínima de 20 KHz/división, pero el estudio se limita debido a la sensibilidad de 2  $\mu$ V, lo que impide la recepción de pequeñas señales de radio y la comunicación en medias y largas distancias.

**2.1.10 Fuente de corriente Diamond GZV-4000:** esta es una fuente conmutada con un voltaje de entrada de 120V, tiene una salida regulable de 5 a 15 voltios a 40 amperios; además, cuenta con voltímetro y amperímetro análogos. (Figura 19)

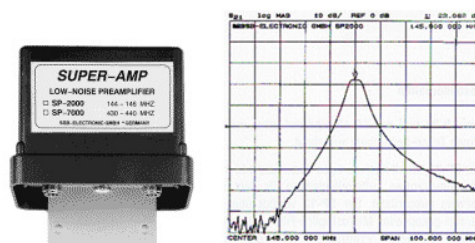
Figura 19. Fuente de corriente Diamond GZV-4000



Fuente: [http://www.rigpix.com/psu/diamond\\_gzv4000.htm](http://www.rigpix.com/psu/diamond_gzv4000.htm)

**2.1.11 Amplificador de bajo ruido LNA:** el SP-7000 está especialmente construido para trabajar en la banda 432/435MHz. Tiene una figura de ruido NF= 0,9dB, ganancia ajustable en un rango de 10-20dB y sistema de filtro helicoidal.

Figura 20. LNA



Fuente: <http://www.hb9cru.ch/Zubehoer/Mastvorverstaerker.htm>

El LNA solo se activa cuando la Estación Terrena está recibiendo ya que su propósito es amplificar la señal recibida a un nivel que sea detectable por el transceptor. El LNA debe conectarse como uno de los primeros componentes en cascada desde los terminales de la antena al radio para obtener una buena relación señal a ruido (S/N), ya que amplifica tanto señal como ruido.

**2.1.12 Conmutador coaxial AS-304:** este conmutador coaxial trabaja en un rango de 0 a 600MHz, tiene una pérdida por inserción de 0,05dB y utiliza alimentación de 12V DC (100mA máx.). Además permite cambiar el sentido de la polarización circular (clockwise – non clockwise y viceversa) por medio de dos puertos.

Figura 21. Conmutador coaxial



Fuente: [http://www.ssb.de/amateur/englisch/amsat/schalter\\_e.shtml](http://www.ssb.de/amateur/englisch/amsat/schalter_e.shtml)

### 3. PROGRAMA DE LA ESTACIÓN TERRENA

Este capítulo describe el funcionamiento del programa diseñado para automatizar el seguimiento del satélite y el sistema de comunicación de la estación terrena.

El programa controla la orientación de las antenas de la estación para lograr una correcta alineación con el satélite, además permite utilizar las funciones básicas del radio, especialmente el cambio de frecuencias que se ajusta a las características de transmisión y habilitar el módulo para enviar y recibir datos. También realiza el cálculo en tiempo real de los parámetros del enlace y decodifica la señal de audio CW recibida.

La orientación de las antenas depende de la posición del rotor, el cual es controlado mediante el programa, de acuerdo a las coordenadas de azimut y elevación que permiten tener línea de vista con el satélite. Los datos de azimut y elevación son importados al programa desde el software de predicción mediante el protocolo de intercambio dinámico de datos (DDE).

Igualmente, el programa controla las funciones de radio como el nivel de **squelch** y volumen, potencia, banda de transmisión, frecuencia, TNC, entre otras. La frecuencia se ajusta automáticamente cuando se hace necesario configurar las frecuencias de transmisión y recepción del satélite que en esos momentos se encuentre en la cobertura de la estación, también cuando se hace el desplazamiento de frecuencias para corregir el efecto Doppler. Además es posible cambiar las frecuencias de forma manual desde el programa con el objetivo de dar autonomía al operador.

El radio tiene incorporado un módulo de transmisión de datos (TNC), apropiado para establecer comunicación con repetidores y sistemas digitales a bordo de satélites de última generación. El TNC es controlado y configurado por el programa teniendo en cuenta el modo de operación (ARPS o paquetes), velocidad de transmisión, tipos de modulación, identificación del equipo entre otras.

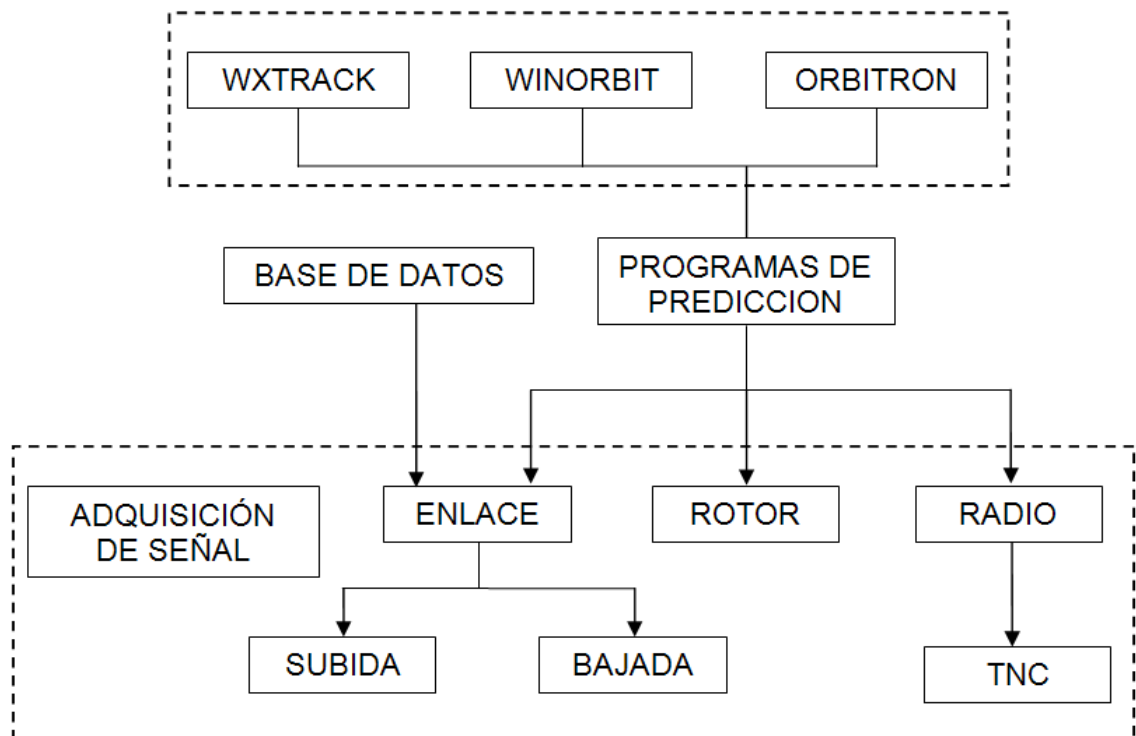
Una herramienta útil del programa es el cálculo en tiempo real de los parámetros que definen la calidad de los enlaces de subida y bajada; teniendo en cuenta los factores que definen el canal de comunicaciones como son: la posición relativa del satélite, las propiedades que tiene el medio para propagar las señales de radio y las características propias de los dispositivos del sistema de comunicaciones.

Además de las anteriores funciones, el programa adquiere, procesa y decodifica la información contenida en la señal Beacon, la cual es un tono en la banda de frecuencias audible codificada en Morse mediante modulación CW. Comúnmente la información muestra las características propias del satélite como su nombre y datos de telemetría donde se especifica el estado actual de sus componentes.

Aparte de las funcionalidades del programa ya descritas se ha tenido en cuenta que el diseño de la interface de usuario sea amigable. Por tal motivo se recurrió a la utilización de graficas, dibujos, colores y pestañas que ayudan al fácil reconocimiento de las partes del programa e interpretación de los datos. Pero, para lograr un balance entre funcionabilidad y una buena presentación existe una fuerte dependencia en el software de programación que se utilice, por lo tanto fue de vital importancia encontrar y decidir que software se ajustaba a nuestras necesidades. LabVIEW fué el más indicado gracias a sus potentes herramientas de programación enfocadas al control y al análisis y procesamiento de señales, además que permite crear instrumentos virtuales, fondos e imágenes que hacen que la interface con el usuario sea agradable.

El programa diseñado se nombró PROET (Programa de la Estación Terrena), a continuación se muestra un diagrama en bloques (Figura 22) del funcionamiento completo de PROET y de los programas necesarios para su funcionamiento.

Figura 22. Diagrama en bloques del funcionamiento del programa



Las aplicaciones de PROET, se designaran como:

PROET\_RADIO, controla el radio.

PROET\_ROTOR, controla el rotor.

PROET\_ENLACE, calcula el enlace.

PROET\_ADQUISICIÓN, adquiere la señal de audio.

PROET\_TNC, controla el TNC.

Para un funcionamiento correcto, PROET depende de los programas de predicción, ya que le suministran datos a PROET\_RADIO (para corrección de la frecuencia), a PROET\_ROTOR (para ubicarlo en el azimut y elevación) y a PROET\_ENLACE (para hacer los cálculos en tiempo real); la base de datos solo es necesaria para PROET\_ENLACE (proporciona información de los satélites de órbita baja operacionales); la aplicación PROET\_ADQUISICIÓN no requiere ningún tipo de programa adicional para su funcionamiento, ya que solo se encarga de grabar (a través de la tarjeta de audio) y reproducir las señales de audio recibidas por el radio; PROET\_TNC es una aplicación que se activa desde el radio y tampoco requiere ningún programa adicional.

### 3.1 PROGRAMAS DE PREDICCIÓN

Los programas de predicción son aplicaciones que calculan la trayectoria del satélite con respecto a una estación fija, de acuerdo a los elementos orbitales<sup>11</sup> que se definieron en el momento de su lanzamiento, estos programas utilizan métodos de cálculo basados en elementos TLE<sup>12</sup>. Los programas de predicción se dividen en predictores de pre-pasada, post-pasada y de tiempo real.

Un programa de predicción de pre-pasada es aquel que calcula las coordenadas y demás parámetros del satélite, antes de que éste pase sobre la estación terrena. Un programa de post – pasada, calcula las variables relacionadas con el satélite para una próxima pasada sobre la estación terrena. Un programa de predicción en tiempo real calcula y permite exportar datos de la trayectoria del satélite durante su paso sobre la estación.

El cálculo de la posición del satélite permite considerar también la distancia desde la estación terrena y la velocidad de desplazamiento, y al conocer la velocidad se puede calcular el efecto del desplazamiento de frecuencia. Todos los datos se extraen mediante DDE, para nuestro caso, los programas de predicción son servidores y PROET es el cliente.

Las predicciones que se tomaron como referencia para validar los programas de predicción que se utilizaron fueron las suministradas en línea por la AMSAT<sup>13</sup> y para observar sus orbitas se utilizó el rastreo de satélites en línea de la NASA<sup>14</sup>.

Se observó que ninguno de los programas de predicción coincidía, sin embargo, por medio del WXtrack se actualizó la base de datos de los elementos orbitales de los satélites, los cuales se suponían fijos desde el momento de lanzamiento. De esta manera se procedió a actualizar las bases de datos de los elementos orbitales del WinOrbit y del Orbitron. Además, cada programa de predicción se sincroniza respecto al meridiano de Greenwich, es decir, hay que ubicar Neiva 5 horas, 1 minuto y 12.19 segundos atrasada del tiempo UTC.

---

<sup>11</sup> Época, Inclinación de la órbita, Ascensión recta del nodo ascendente, Argumento del perigeo, excentricidad de la órbita, Cantidad de Órbitas por día, Anomalía Media.

<sup>12</sup> Un elemento TLE es un modelo matemático estándar empleado para describir la órbita de un satélite.

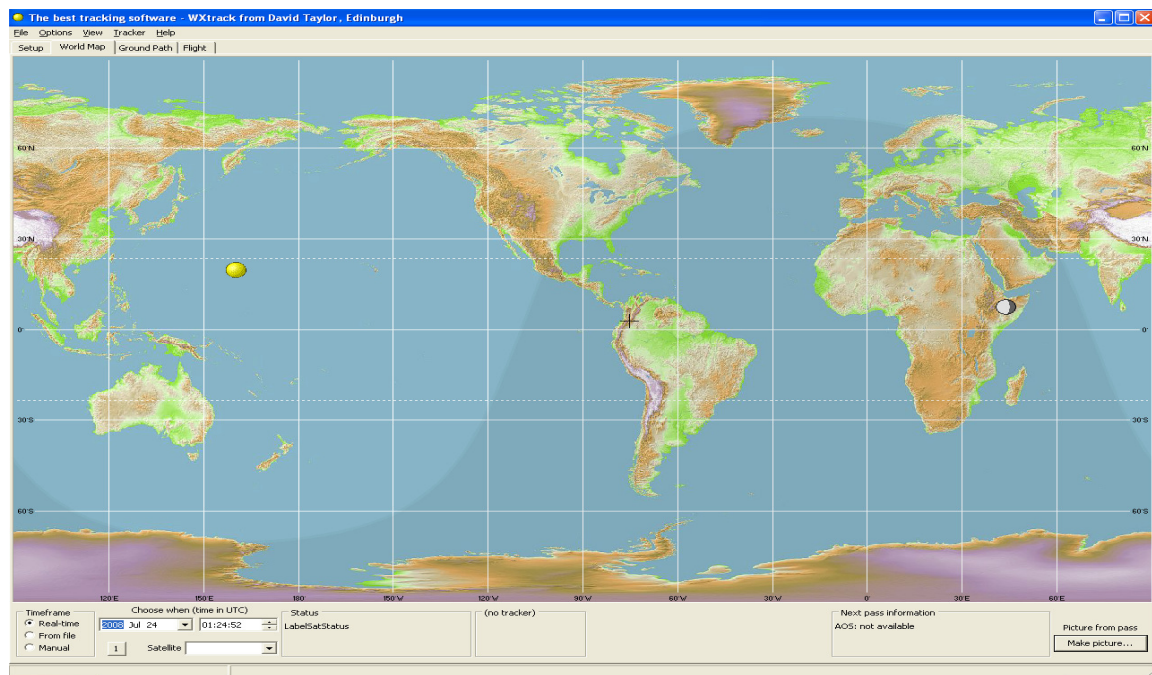
<sup>13</sup> <http://www.amsat.org/amsat-new/tools/predict/index.php>

<sup>14</sup> <http://science.nasa.gov/Realtime/jtrack/3d/JTrack3D.html>

Finalmente, al WinOrbit hay que copiarle una librería dinámica (vbrun300.dll) para que funcione correctamente.

**3.1.1 WXtrack:** es un programa de predicción de pre-pasada y de tiempo real pero no deja exportar datos, por lo tanto se utiliza como programa de pre-pasada, porque permite conocer de un satélite específico, la hora y el número pasos en el día sobre la estación, así como los ángulos de elevación y azimut a los que deben estar alineadas las antenas durante el paso del satélite sobre la estación.

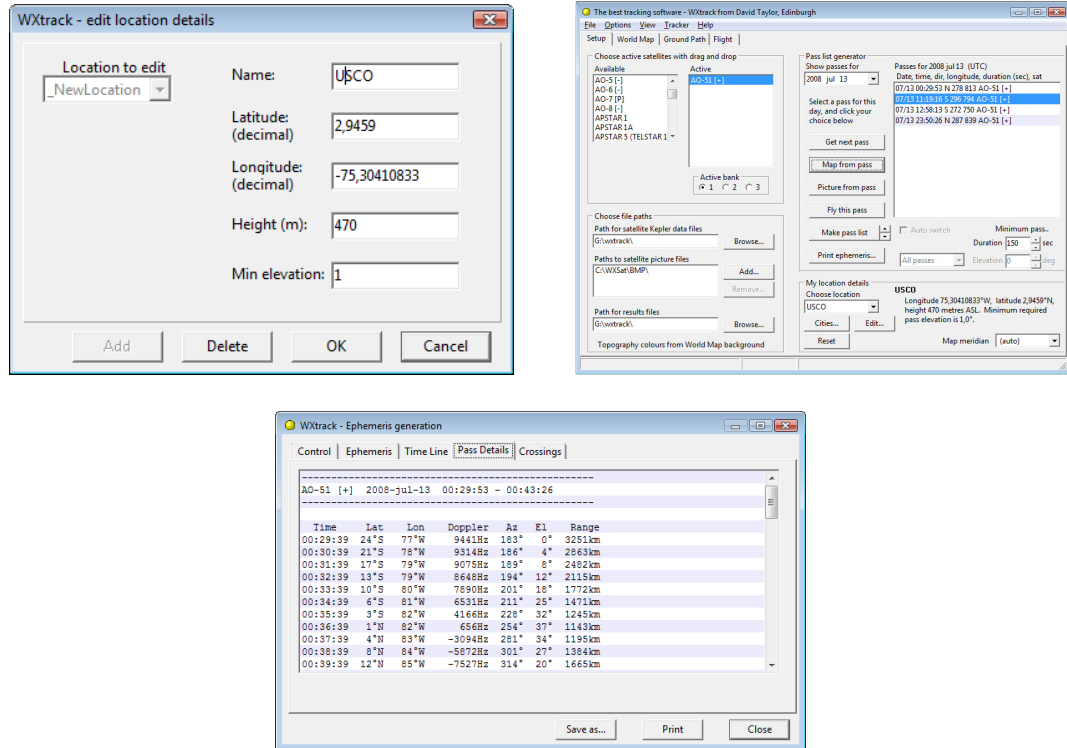
Figura 23. Apariencia del WXtrack



Este programa permite visualizar la trayectoria de las órbitas de más de un satélite, ofrece la posibilidad de desplazar los satélites de forma manual y de forma automática (en tiempo real), genera una lista (documento de texto plano) de los posibles satélites cuya trayectoria entra en la cobertura de los equipos de comunicación, y si se quieren ver más detalles del paso de los satélites, solo tenemos que dar clic en la pestaña de configuración y clic en imprimir efemérides, escogemos el formato de la hora y la cantidad de días de los que queremos información; se podrán ver los datos del intervalo de tiempo de cobertura del satélite, se obtendrá información por minuto de latitud, longitud, Doppler, azimut, elevación y distancia.

La configuración del WXtrack se debe hacer de la siguiente manera (Ver Figura 24): hay que introducir las coordenadas de la estación terrena, en este caso  $2^{\circ}56'45.24''$  N  $75^{\circ}18'14.79''$  W, escoger el satélite deseado, y dar clic en print ephemeris, para obtener los detalles de las pasadas del satélite sobre la estación terrena.

Figura 24. Configuración del WXtrack

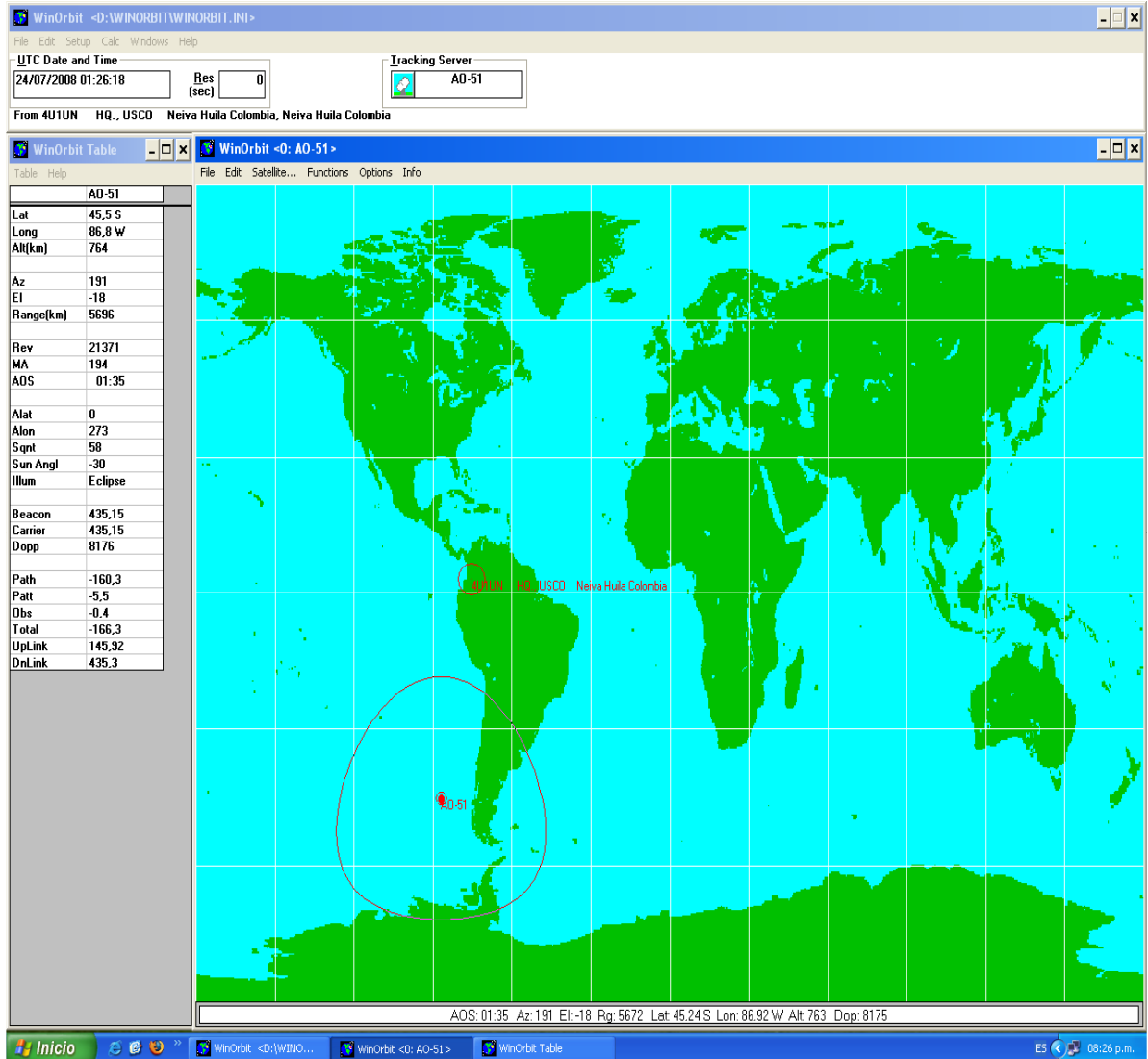


**3.1.2 WinOrbit:** el WinOrbit es un programa de predicción de pre-pasada y de tiempo real, de él se exportan el valor del desplazamiento de la frecuencia debida al efecto Doppler, los ángulos de elevación y azimut en los que se encuentra el satélite, el nombre del satélite, la frecuencia de la beacon y las frecuencias de subida y bajada.

Este programa permite desplazar los satélites de forma manual y automática (en tiempo real), pero a diferencia del WXtrack, para conocer todos los datos de la próxima pasada del satélite se debe hacer de forma manual todo el recorrido de la órbita hasta que vuelva a entrar en el área de cobertura, por eso, este programa se escogió para hacer la predicción de la trayectoria en tiempo real, sin embargo, el WinOrbit calcula solo el azimut, la elevación y la distancia de la próxima pasada.

El WinOrbit proporciona datos de latitud, longitud, altura de la órbita, azimut, elevación, frecuencias de los enlaces de subida y de bajada, frecuencia de la beacon, entre otros. Sin embargo, solo se exportan los datos ya mencionados, indispensables para el control de los equipos.

Figura 25. Apariencia del WinOrbit



Se debe configurar de la siguiente manera (Ver Figura 26 y 27), hay que introducir las coordenadas de la estación terrena, introducir la diferencia en horas con el tiempo universal, y escoger el satélite en las tres ventanas que tiene el WinOrbit.



Figura 26. Configuración del WinOrbit. Coordenadas estación terrena

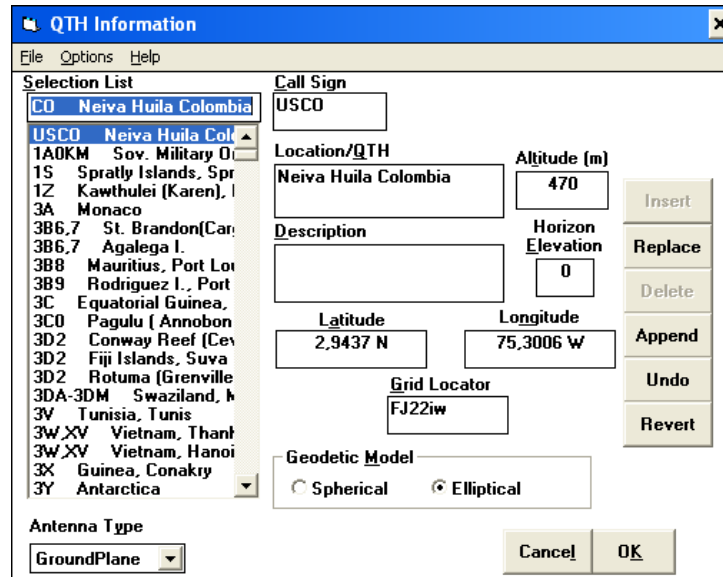
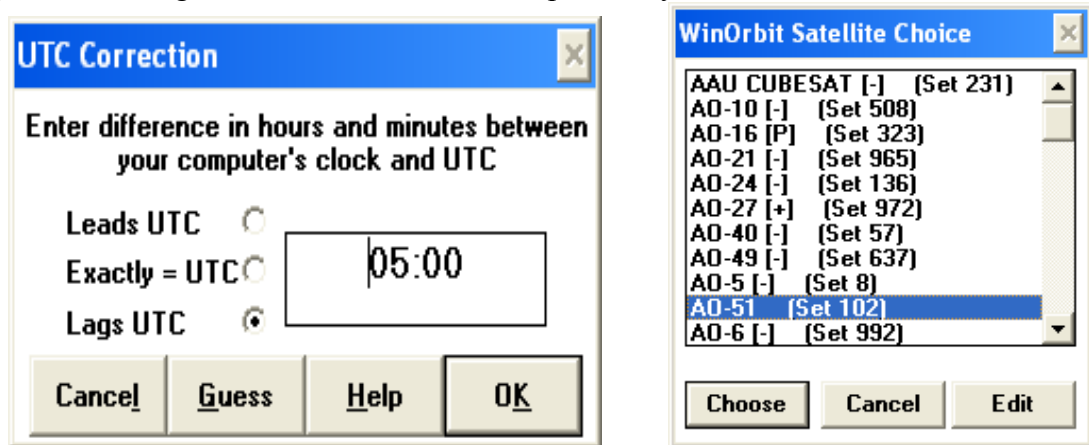
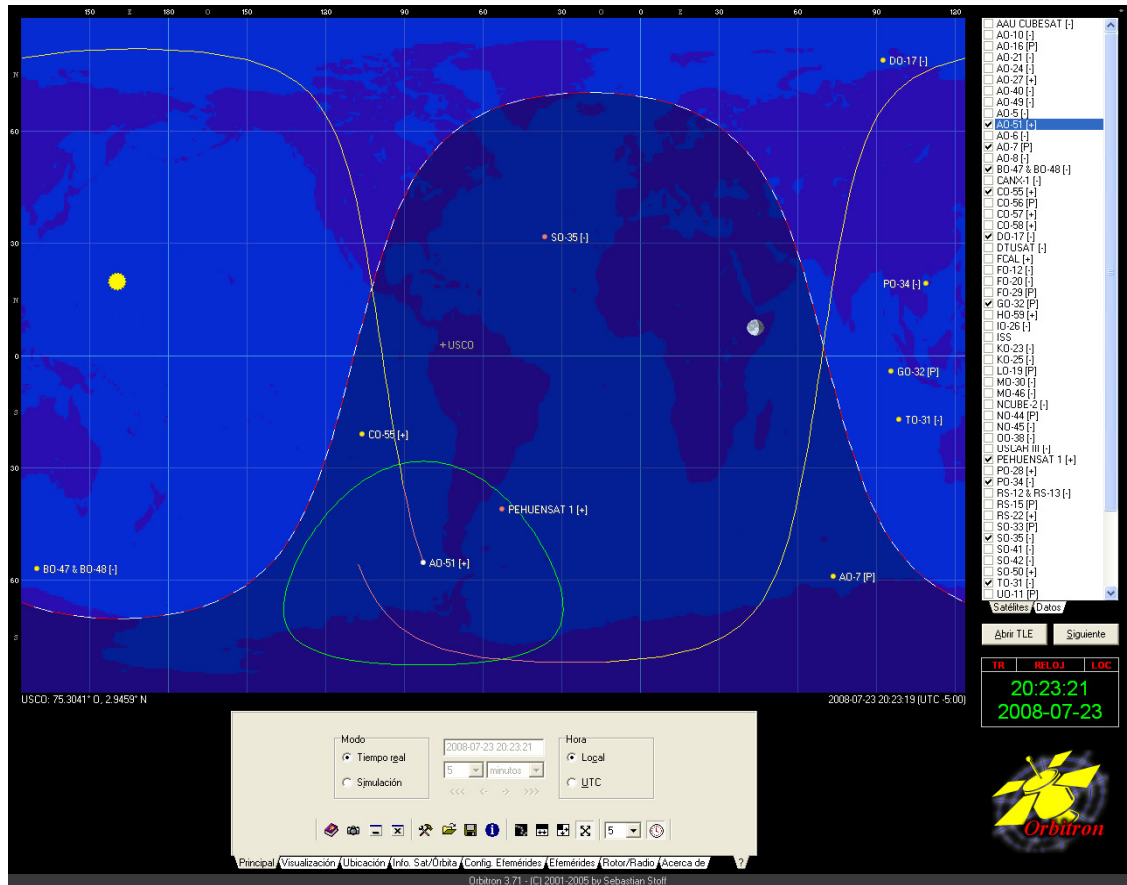


Figura 27. Configuración del WinOrbit. Tiempo UTC y Satélite



**3.1.3 Orbitron:** es un programa de predicción de pre-pasada y de tiempo real, de él se exportan datos de azimut, elevación, frecuencia de subida y bajada y frecuencia de beacon (modificadas por el efecto Doppler) en tiempo real.

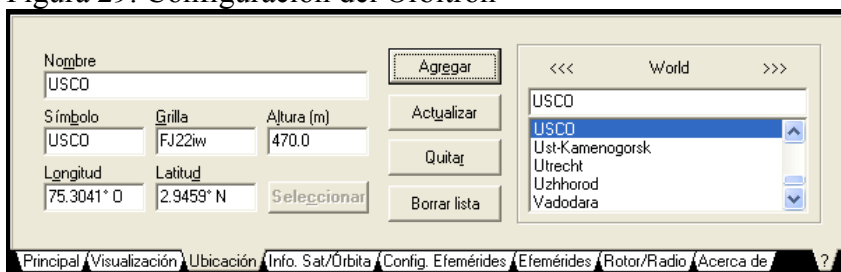
Figura 28. Apariencia del Orbitron



Permite la visualización de varios satélites, el control manual y automático de desplazamiento, permite calcular los datos de las siguientes pasadas, tiene una completa base de datos de los satélites, proporciona información sobre trayectoria y la ubicación de la luna y el sol. Pero, requiere habilitar el envío de datos cada vez que se desee correr PROET.

Para configurarlo (Ver Figura 29), primero debe agregar las coordenadas de la estación terrena, escoger los satélite y activar el envío de datos a través del DDE.

Figura 29. Configuración del Orbitron



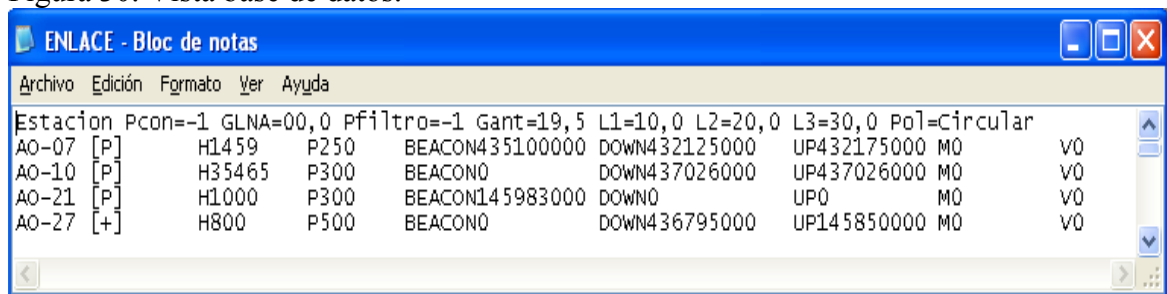


Los programas de predicción deben haber iniciado antes que el PROET, de lo contrario el programa no correrá.

### 3.2 BASE DE DATOS

Se hizo una base de datos de los satélites de órbita LEO que actualmente se encuentran en funcionamiento, para que PROET cargue la información de los satélites y complete los datos para el cálculo del enlace. La información para hacer la base de datos se obtuvo de la AMSAT<sup>15</sup>. PROET extrae de la base de datos la altura, apogeo y perigeo de la órbita, la potencia de transmisión, la frecuencia de la beacon, las frecuencias de subida y de bajada, la modulación y la velocidad de transmisión de un satélite específico. Hay que tener en cuenta que la base de datos se debe estar actualizando y verificando con la base de datos de la AMSAT.

Figura 30. Vista base de datos.



<sup>15</sup> <http://www.amsat.org/amsat-new/satellites/status.php>

### 3.3 PROET

PROET es un programa hecho en LabVIEW para hacer el proceso de comunicación entre el satélite y la estación de forma automática, está constituido por varias aplicaciones, que se encargan de controlar los equipos de la estación terrena.

El programa presenta un panel frontal dividido en pestañas, cada una de ellas contiene la interface grafica de una aplicación de PROET. La utilización de pestañas permite visualizar los cálculos del enlace (Enlace de subida y Enlace de bajada), el estado del rotor, el panel frontal del radio, la consola del TNC y las herramientas para grabar y reproducir el audio del radio.

El programa se diseño únicamente para satisfacer las necesidades que se presentaron durante el proceso de implementación del sistema de comunicaciones de la estación terrena USCO. El código fuente se distribuyó por segmentos, de acuerdo a cada aplicación de PROET con la finalidad de hacer más fácil su interpretación, de igual forma, PROET está abierto para que se realice cualquier modificación o mejora, por ejemplo, utilizar todas las funciones del radio (APRS, SSTV...), hacer la interface para otro radio, habilitar el uso del programa del TNC (no solo para el que tiene incorporado el radio Kenwood TM D700 sino para cualquier otro modelo), implementar el análisis de las señales recibidas, etc.

**3.3.1 PROET\_RADIO:** controla el radio de la estación terrena mediante el uso de comandos<sup>16</sup>, y permite visualizar su estado.

El funcionamiento de PROET\_RADIO consiste en establecer una comunicación serial entre el radio y el computador. El protocolo de comunicación para modificar una característica o ejecutar una función del radio consiste en enviar un comando (especificando la tarea) continuamente hasta que el radio confirme la ejecución de la tarea, por ejemplo, si se quiere entrar al modo TNC paquetes, se envía el comando TNC 2 continuamente hasta que el radio devuelva el mismo comando (TNC 2), lo que indica que la orden se realizó. Y para conocer el estado del radio, el protocolo de comunicación consiste en enviar diferentes comandos (sin especificar la tarea) al radio hasta que éste devuelva el comando especificando su estado, por ejemplo, si se pregunta por el estado del TNC, se envía el comando TNC y el radio indicará en qué modo se encuentra (TNC 0 (OFF), TNC 1 (APRS), TNC 2 (PAKET)).

---

<sup>16</sup> <http://www.jgav.com/ham/tmd700a.htm>, <http://www.qsl.net/k7jar/pages/D700Cmds.html>

Figura 31. Interface gráfica de PROET\_RADIO

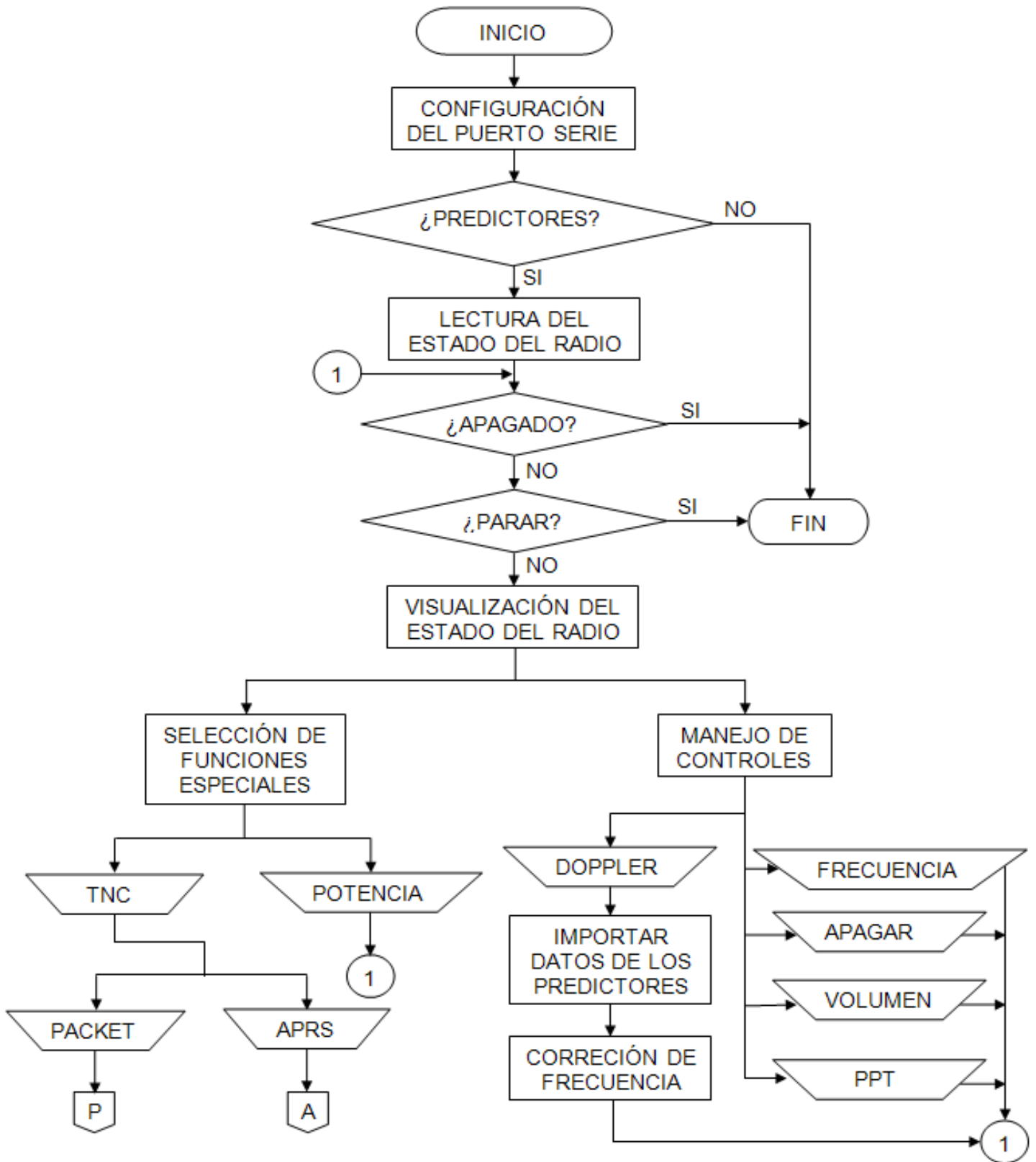


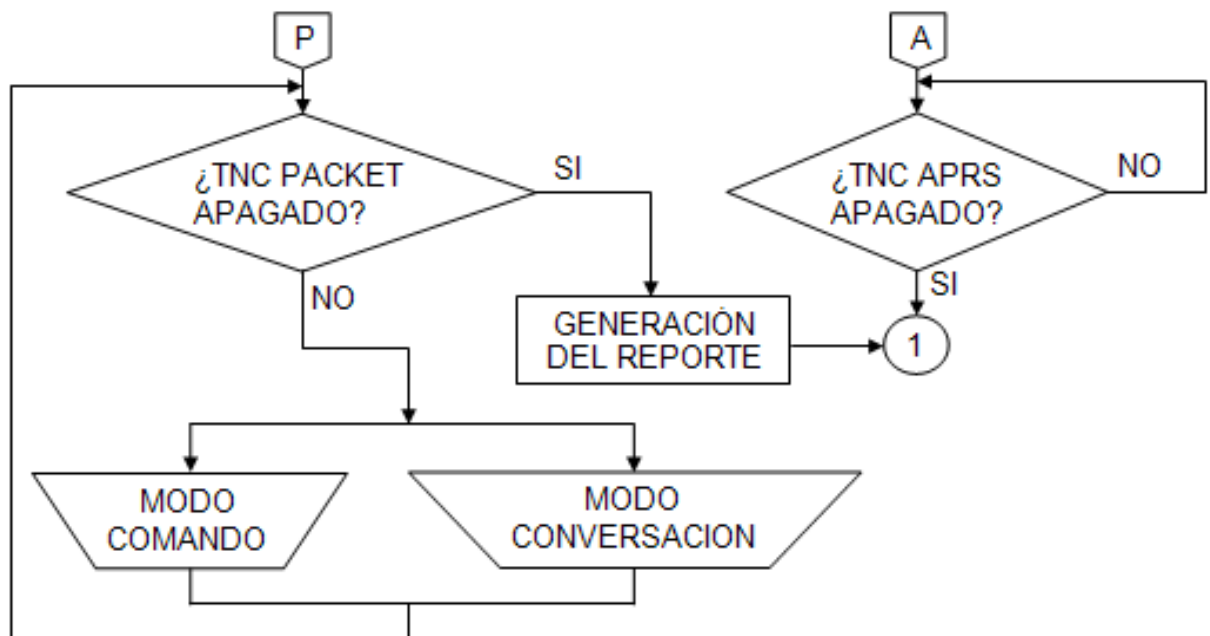
La interface gráfica de PROET\_RADIO (Figura 31) muestra los botones más básicos del radio (volumen, perilla de frecuencia, botón de PTT y de apagado), permite visualizar las frecuencias de cada banda, el nivel de potencia de la señal recibida (como una barra de progreso), el nivel de potencia de la señal transmitida (L,M,H), la banda que está habilitada para PTT y el modo del TNC.

Además, como elementos adicionales, posee un display que contiene el nombre del satélite, un control para habilitar la corrección de la frecuencia debida al efecto Doppler, un control para digitar la frecuencia exacta en la que se quiere sintonizar y un menú de funciones especiales; éste contiene funciones asociadas a la potencia y al TNC.

El diagrama de flujo (Figura 32) representa el funcionamiento del programa; como primera tarea, el programa configura el puerto serie (establece por defecto un puerto, la velocidad de comunicación, el control de flujo, la longitud de la palabra y la paridad. La velocidad por defecto es 9600 bps, así que es necesario revisar que el radio esté configurado a esta velocidad, MENU → RADIO (1) → AUX (9) → PUERTO COM (5)), luego se verifica si los softwares de predicción están en funcionamiento (se requieren los valores corrimiento de la frecuencia debida al efecto Doppler), se verifica que el radio esté encendido, se visualizan los datos obtenidos del radio y se activan los controles antes descritos.

Figura 32. Diagrama de flujo del funcionamiento de PROET\_RADIO





**3.3.2 PROET\_TNC:** el programa del TNC consiste en activar una consola que permite utilizar los comandos para TNC<sup>17</sup>. El TNC tiene dos modos de funcionamiento, el modo conversación en donde se escriben los datos que se desean enviar, y el modo comando, en el cual se configura la comunicación entre estaciones<sup>18</sup>, en este modo aparece en la consola “cmd”.

Lo primero que se debe hacer al entrar en modo TNC es ajustar la velocidad de transferencia entre el PC y el TNC. La velocidad por defecto del TNC es 1200 bps, pero la comunicación serie que se configuró por defecto con el radio es 9600 bps.

Cmd: HB 9600

Luego debe establecerse el indicativo de la estación (numero de máximo 9 dígitos).

Cmd: MY #####

Y finalmente se debe conectar con la estación de destino marcando su indicativo.

Cmd: C #####

Debe esperarse hasta que el radio envíe confirmación de que se encuentra conectado con la estación de destino.

<sup>17</sup> Manual de Instrucciones TM-D700. Comunicaciones Especializadas. Apéndice

<sup>18</sup> Manual de Instrucciones TM-D700. Comunicaciones Especializadas. Funcionamiento del TNC

Si se desea configurar otros parámetros del TNC se debe consultar el manual de instrucciones del radio (Kenwood TM D700).

Luego de configurar el TNC, pase al modo conversación escribiendo K o dando clic en el botón correspondiente.

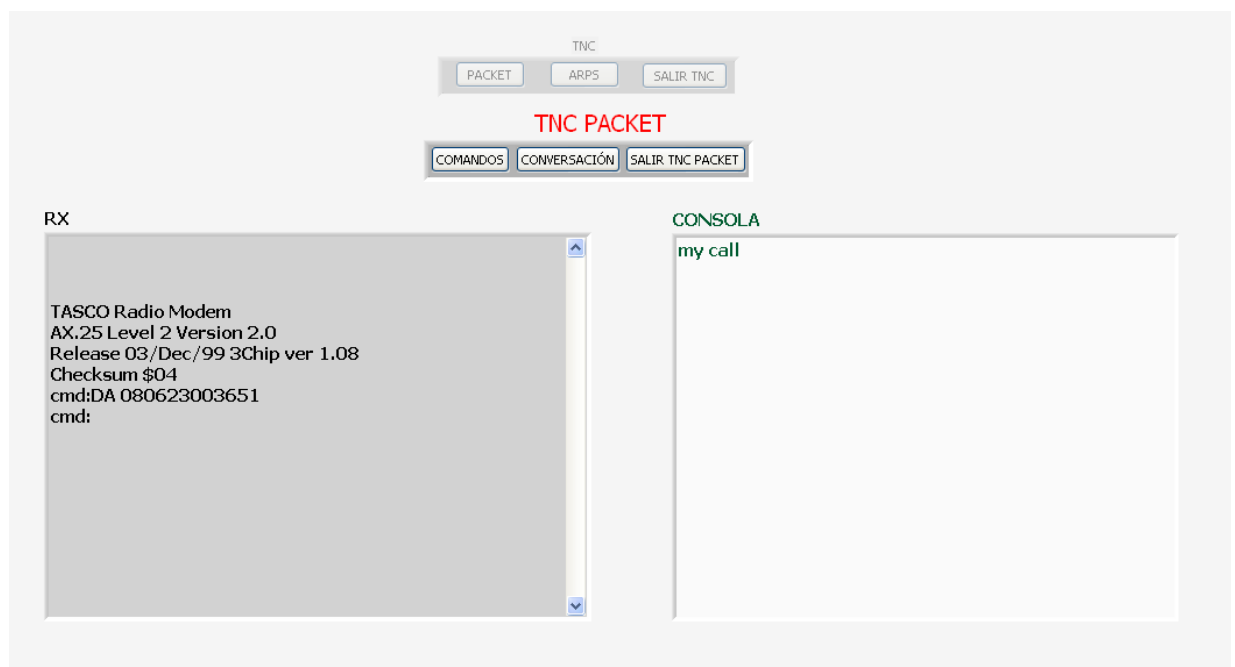
Cmd: K

La recepción de datos es de forma automática, para enviar datos solo debe pulsar la tecla enter.

Al entrar el radio en el modo TNC, el control remoto del radio se deshabilita, impidiendo corregir el efecto Doppler. Sin embargo, este radio tiene un puerto para agregar un TNC externo, lo que permitiría, hacer control remoto y enviar datos simultáneamente.

Cuando el programa sale del modo TNC se habilita nuevamente el control remoto del radio y se genera un reporte de los datos introducidos y recibidos. El reporte es un archivo plano que toma como nombre la hora en que se realiza y se guarda en la carpeta donde esta el programa (Software\Reportes\Satélite\TNC\Fecha).

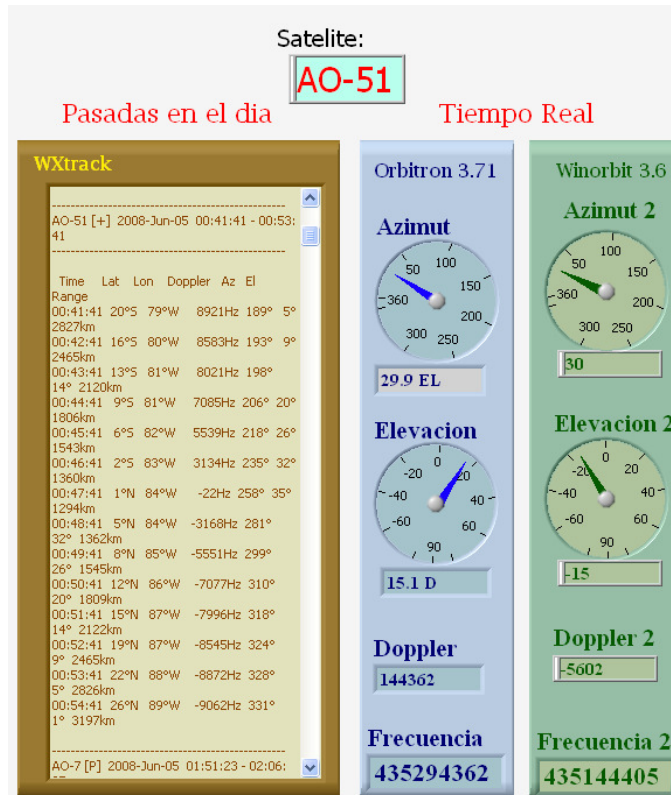
Figura 33. Interface gráfica de PROET\_TNC



**3.3.3 PROET\_ROTOR:** este programa controla el desplazamiento del rotor tanto en azimut como en elevación, de acuerdo a los datos obtenidos de los programas de predicción. El control del rotor se realiza estableciendo una comunicación serie entre la interface GS – 232B y el PC.



Figura 34. Interface gráfica de PROET\_ROTOR



El control del rotor empieza cuando el satélite se encuentra en el horizonte, es decir cuando los valores de elevación se encuentren entre 0 y 90 grados. Para modificar la posición del rotor es necesario enviar el siguiente comando.

WTTT XXX YYY 450 180

Donde:

TTT= valor del paso

XXX = azimuth

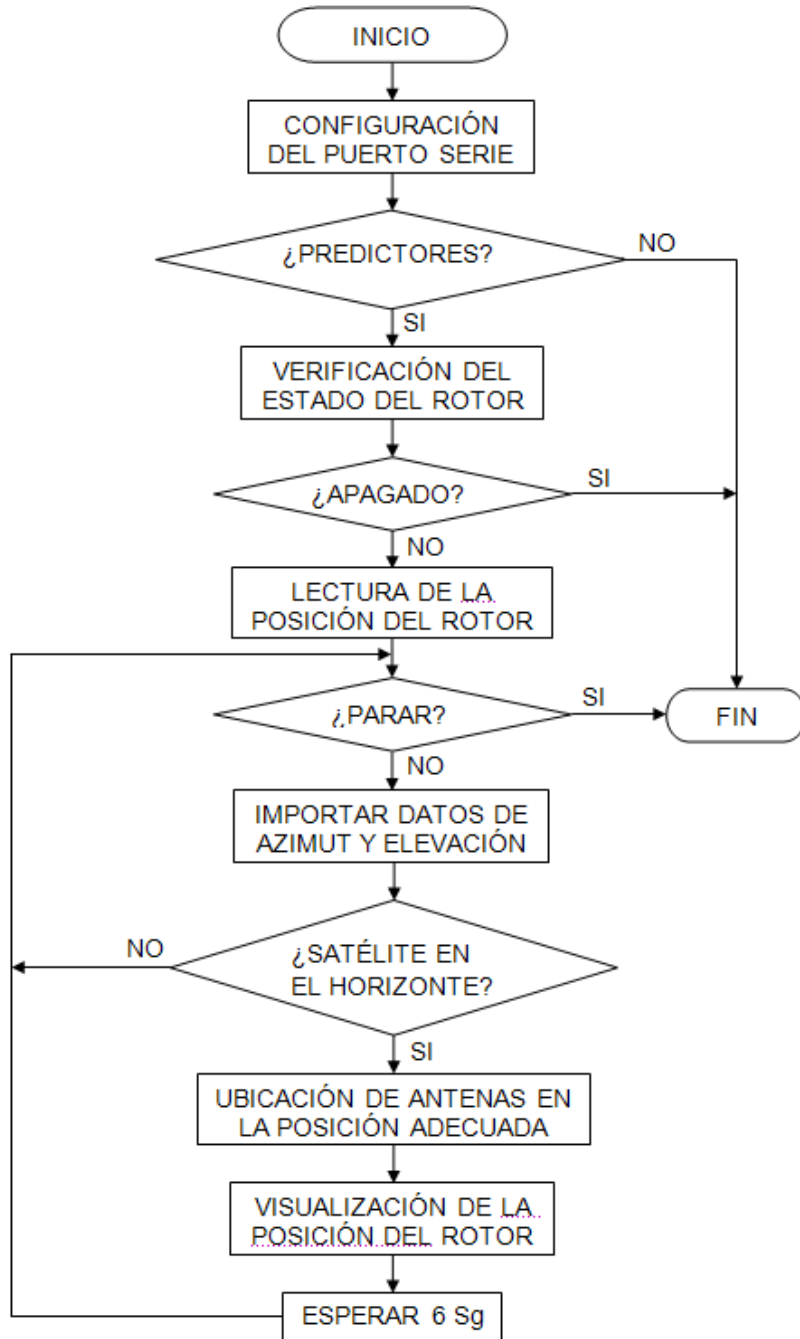
YYY= elevación

La interface grafica de PROET\_ROTOR (Figura 34) permite visualizar los valores azimuth y elevación que se importan de los programas de predicción (orbitron y winorbit), además, muestra una lista con información de los satélites cuya trayectoria entra en la cobertura de los instrumentos de comunicación de la estación terrena (lista importada del WXtrack).

El diagrama de flujo (Figura 35) muestra el funcionamiento de PROET\_ROTOR, la primera etapa consiste en configurar el puerto serie al que se conecta la interface GS – 232B, seguidamente se pregunta si los programas de predicción se están ejecutando (es indispensable que los programas se estén ejecutando, de lo contrario no se podrá hacer

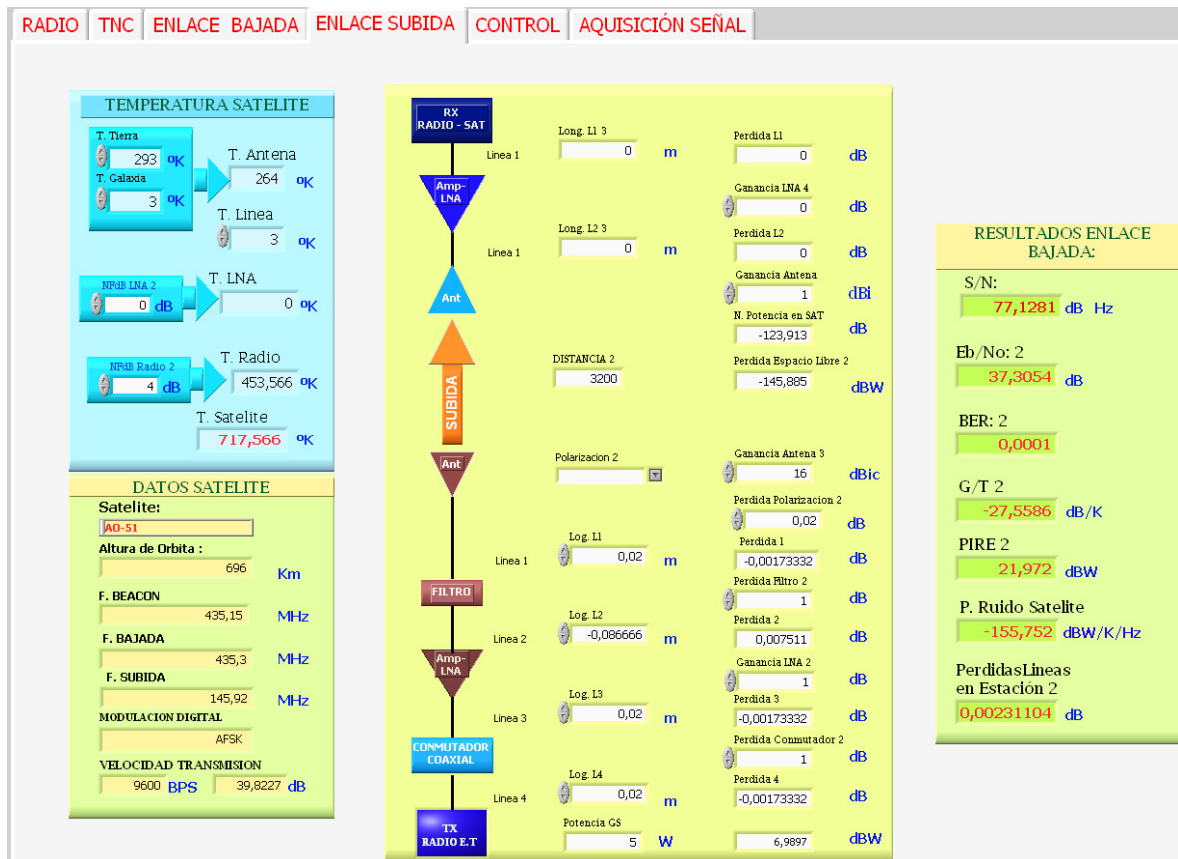
ningún control), se lee la posición del rotor y se modifica de acuerdo a los valores obtenidos de los programas de predicción siempre y cuando el satélite se encuentre entre los ángulos de elevación que representan el horizonte de la estación terrena, se visualiza la posición del rotor, se espera una cantidad de tiempo determinada (para evitar sobrecontrolar el rotor) y se repite nuevamente el procedimiento.

Figura 35. Diagrama de flujo del funcionamiento de PROET\_ROTOR



**3.3.4 PROET\_ENLACE:** es un programa que calcula en tiempo real el enlace de comunicaciones entre la estación terrena y el satélite, para esto se utiliza la información obtenida de los programas de predicción y de la base de datos.

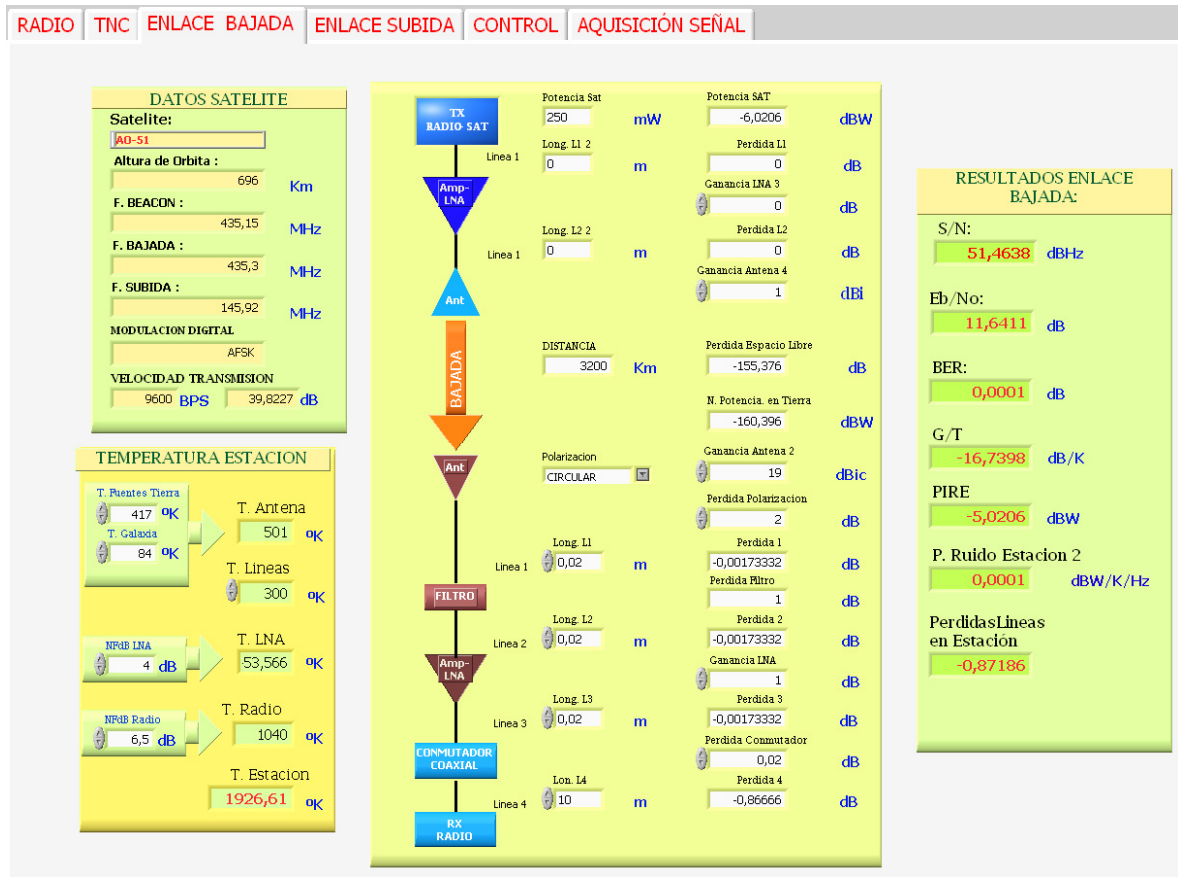
Figura 36. Interface gráfica de PROET\_ENLACE. Enlace de subida



La interface grafica (Figura 36 y 37) está dividida en secciones que representan los datos del satélite, los datos de la estación terrena y los parámetros del enlace. Hay dos pestañas, cada una para un tipo de enlace específico (enlace de subida y enlace de bajada).

El cálculo del enlace se hace sin necesidad de que el usuario introduzca datos, ya que el programa tiene por defecto valores predeterminados, sin embargo con el objetivo de hacer el programa interactivo, PROET\_ENLACE permite escoger algunos parámetros del enlace como son: la polarización y ganancia de la antena, las longitudes de las líneas de transmisión, la ganancia del LNA, y las temperaturas que influyen en la caracterización del enlace. Esta característica le ofrece al usuario sacar sus propias conclusiones sobre el enlace de comunicaciones y podrá rediseñar el sistema con el fin de hacer más eficiente la estación terrena.

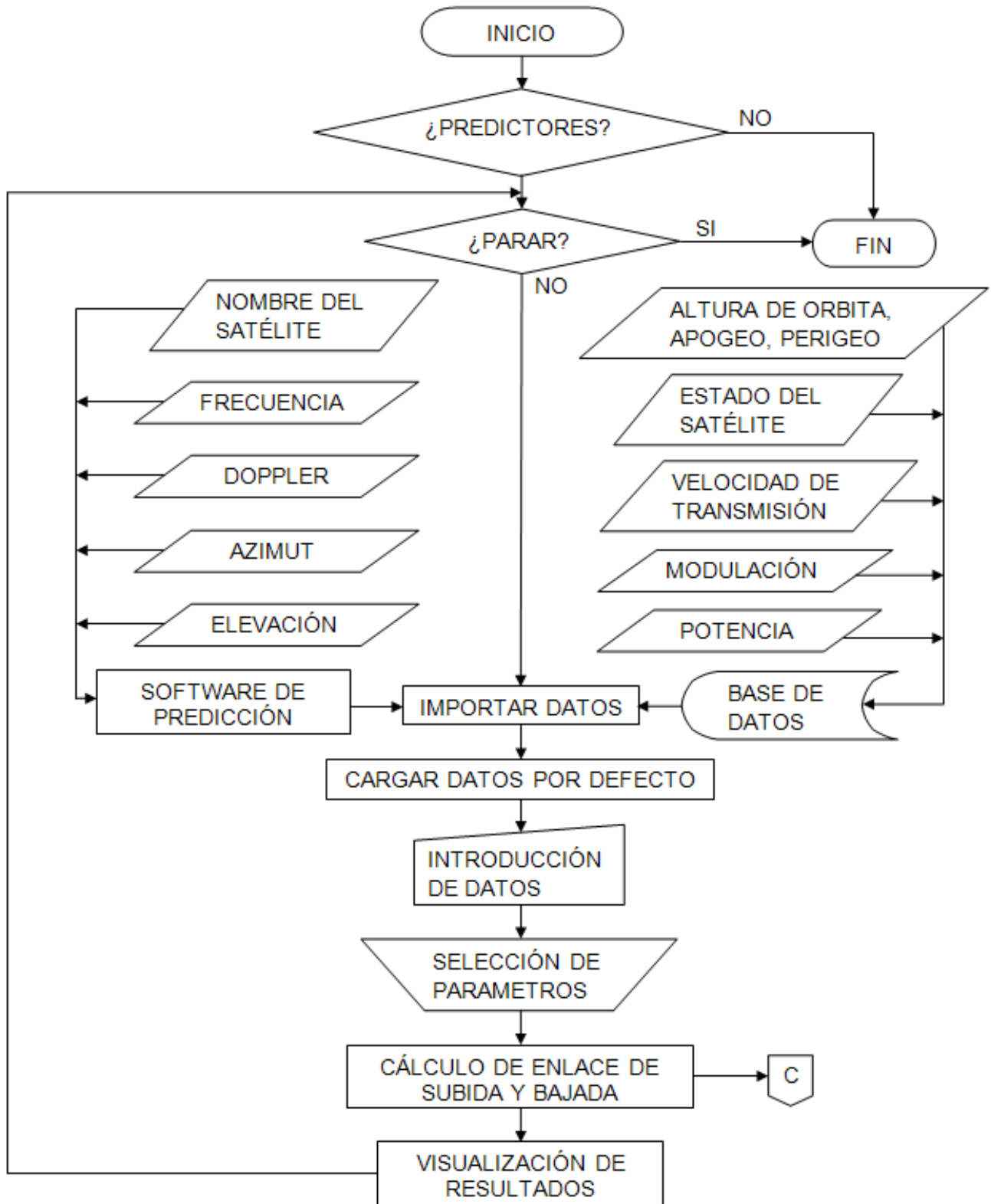
Figura 37. Interface gráfica de PROET\_ENLACE. Enlace de bajada

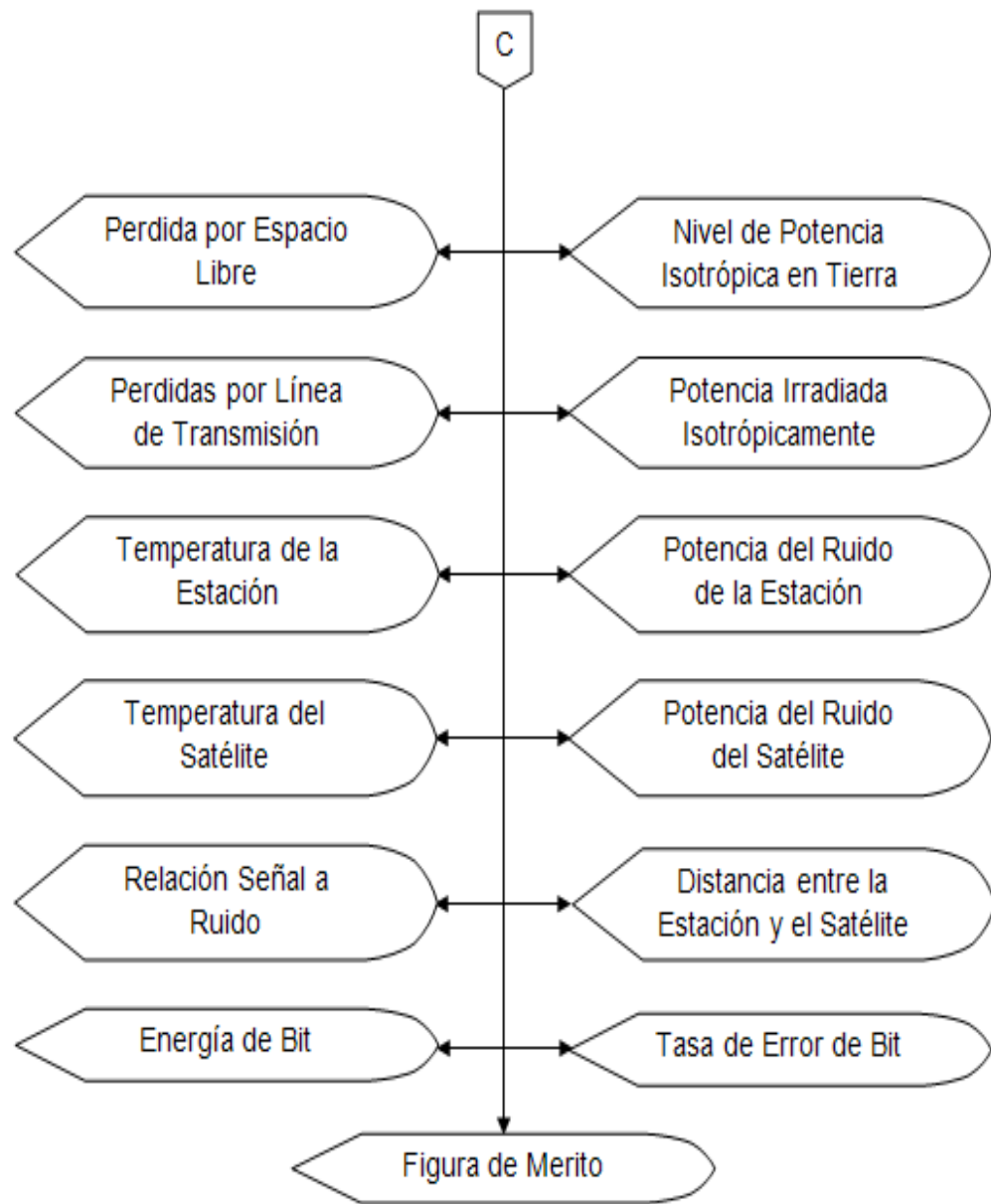


A continuación se muestra un diagrama de flujo (Figura 38) que explica el funcionamiento de PROET\_ENLACE. Debido a que esta aplicación de PROET se realiza en tiempo real, sin los programas de predicción no se hará ningún cálculo, por ello, la primera tarea es comprobar que los programas de predicción estén en funcionamiento, de ellos se importan, el nombre del satélite, las frecuencias de subida y bajada, el valor del desplazamiento en frecuencia debido al efecto Doppler, el azimut y la elevación; de la base de datos se obtiene el estado del satélite (operacional, no operacional, semi-operacional), la altura de la órbita, la velocidad de transmisión, modulación, potencia de transmisión, y las distancias en el apogeo y en el perigeo. Luego se cargan los datos por defecto, como por ejemplo los valores de las temperaturas, las ganancias de las antenas, la ganancia del LNA; se seleccionan algunos parámetros, como la polarización.

Finalmente se hacen los cálculos utilizando las ecuaciones mencionadas en el capítulo 1, se calculan las pérdidas por espacio libre, nivel de potencia isotrópica en la tierra, la figura de merito, la relación señal a ruido, la energía de bit, la potencia del ruido del satélite, potencia del ruido de la estación, tasa de error de bit, potencia irradiada isotrópicamente, las pérdidas debidas a las líneas de transmisión, la temperatura de la estación, la temperatura del satélite y la distancia desde la estación terrena hasta el satélite.

Figura 38. Diagrama de flujo del funcionamiento de PROET\_ENLACE

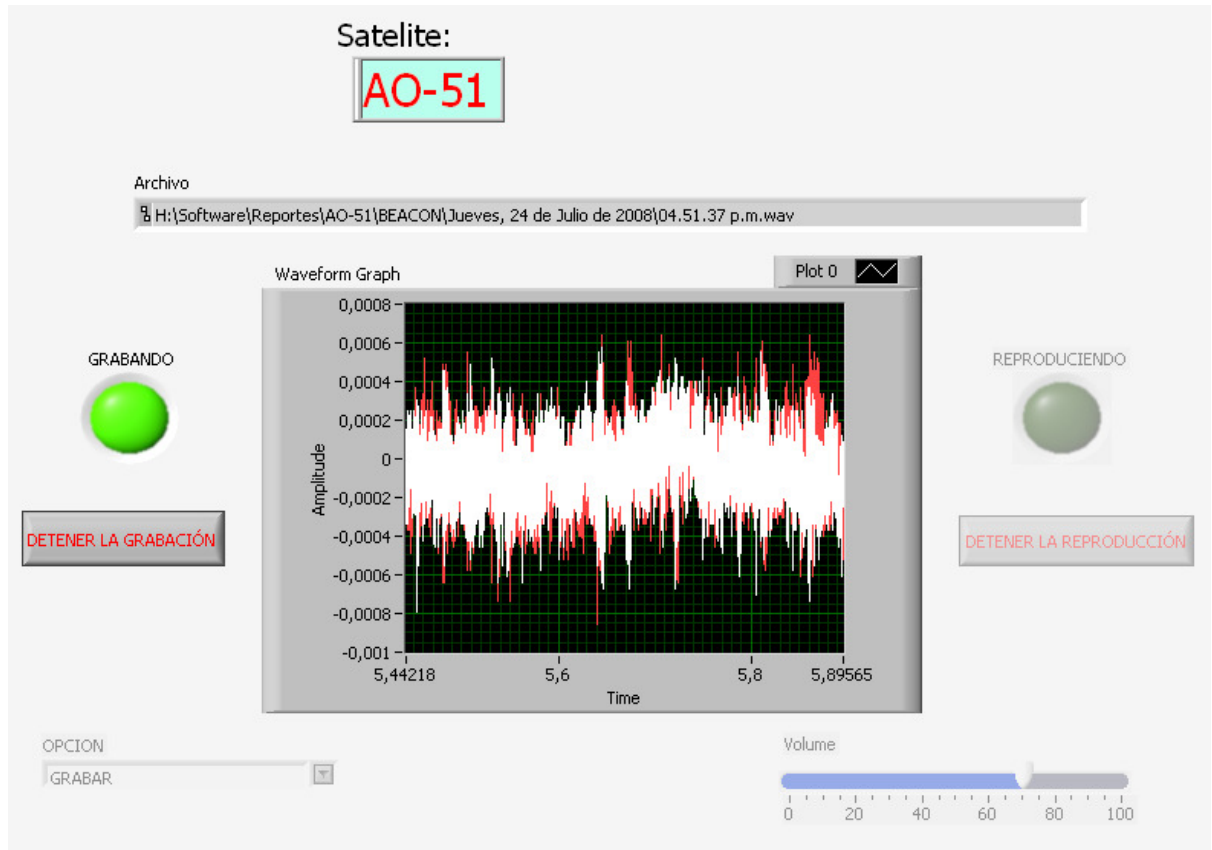




**3.3.5 PROET\_ADQUISICIÓN:** la señal de audio que emite el satélite está modulada en CW y es un código Morse que contiene información sobre el satélite. Este programa se encarga de adquirir por medio de la tarjeta de audio la señal que recibe el radio.

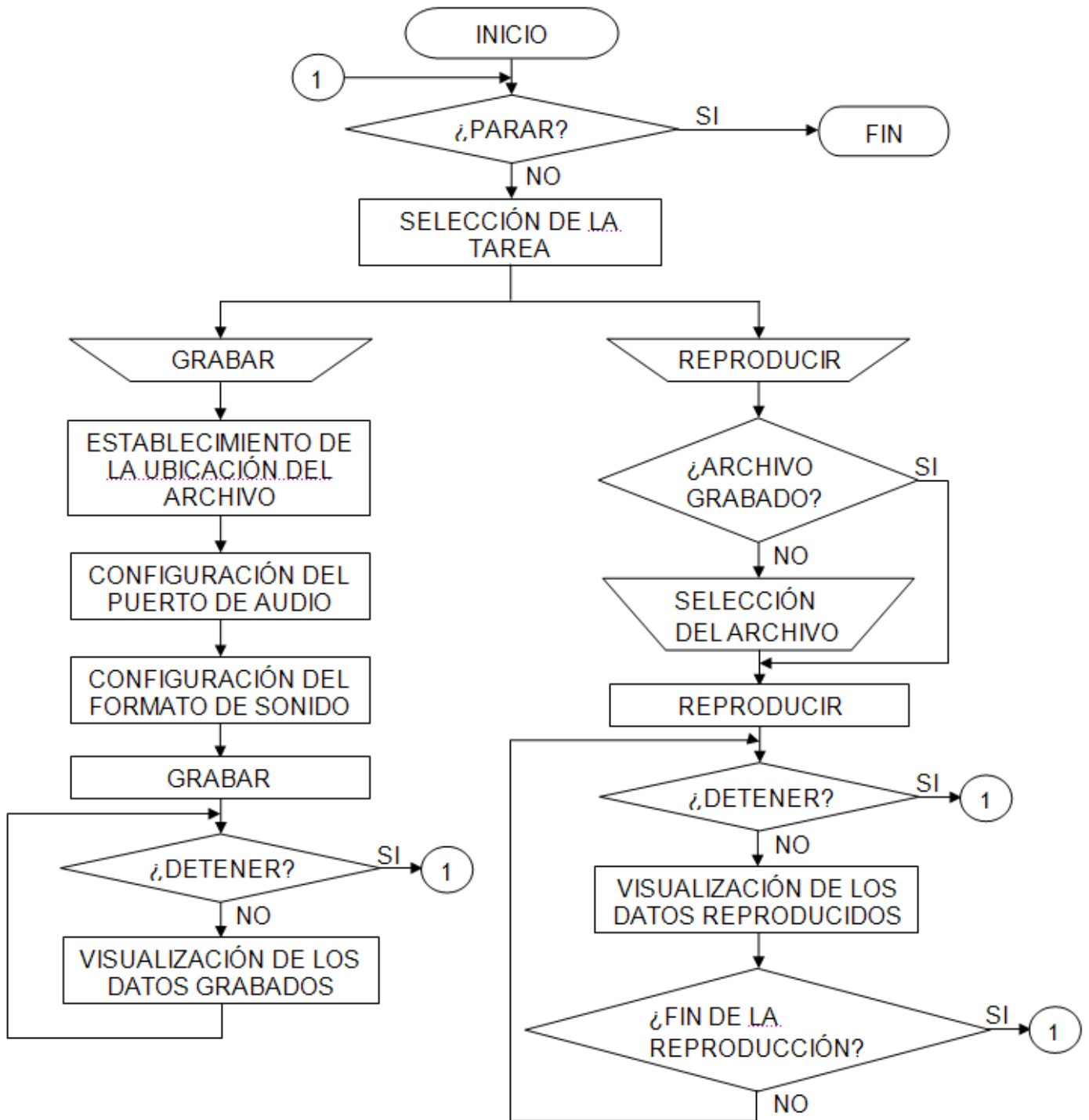
La interface gráfica (Figura 39) tiene un menú para seleccionar la acción que se desea realizar, es decir, si se quiere grabar la señal del radio o reproducir un archivo de audio ya guardado; además, tiene una herramienta para graficar y visualizar la forma de la señal, tiene un display que muestra la dirección de ubicación del archivo, un display para mostrar el nombre del satélite, y unos botones para detener la reproducción o grabación.

Figura 39. Interface gráfica de PROET\_ADQUISICIÓN



El funcionamiento del programa, representado en el diagrama de flujo (Figura 40), consiste en elegir que tarea se desea realizar (Grabar o Reproducir). Si se selecciona grabar, primero se carga la dirección por defecto (Carpeta PROET\Reportes\Satélite\BEACON\Fecha) donde se guarda el archivo de audio (siempre en formato wav), se configura el puerto de audio (elección del dispositivo de entrada), se configura el formato de sonido (el número de muestras por canal, la rata de muestras, el número de canales y el número de bits por muestra), se inicia la grabación y se visualizan los datos obtenidos. Si se selecciona reproducir, primero se verifica que no se haya grabado ningún archivo durante la ejecución de PROET, si se ha grabado, el archivo se reproduce y se visualizan los datos, si no se ha grabado, se escoge la ubicación del archivo, se reproduce y se muestran los datos.

Figura 40. Diagrama de flujo del funcionamiento de PROET\_ADQUISICIÓN





## 4. MONTAJE Y PRUEBAS

Las prácticas de laboratorio constituyen la esencia del conocimiento científico y tecnológico, porque nos permiten analizar e inferir sobre el comportamiento real del objeto de estudio.

Este capítulo describe el procedimiento para caracterizar y evaluar los equipos de comunicación y control de la estación terrena, teniendo como referencia los cálculos y simulaciones realizadas previamente, es así, que los resultados de estas pruebas definirán el éxito del proyecto.

Una de las pruebas fundamentales es la medición de las características eléctricas de las antenas, ya que permiten verificar si cumplen con los requerimientos (ganancia, directividad y polarización) para establecer la comunicación con satélites de órbita baja. Otra prueba decisiva es reconocer señales que puedan causar interferencia en las bandas de frecuencia que la estación utiliza para establecer comunicación, ya que cualquier otra señal que se encuentre cerca puede impedir la recepción completa, o causar pérdida temporal de la señal.

La evaluación de los resultados de las pruebas permite elegir la instalación adecuada de los equipos para garantizar la comunicación con los satélites de la red CUBESAT y de radioaficionados que tienen características similares al que se pretende poner en órbita por parte de la Universidad Distrital.

### 4.1 MEDICIÓN SWR

La relación de onda estacionaria (SWR) es la medida que indica el grado de adaptación o acople de la antena con el sistema de comunicaciones. Mientras mayor sea el acople, menor será la potencia reflejada y por tanto mayor cantidad irradiada por la antena al espacio libre. El SWR depende del coeficiente de reflexión ( $\Gamma$ ) y están relacionados por la siguiente ecuación:

$$SWR = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}$$

Cuadro 15. Materiales y equipos de la prueba SWR.

Materiales y Equipos	Cant.
Antena Yagi Cushcraft 13B2 (145MHz).	1
Antena Yagi Cushcraft A44911S (440MHz).	1
Antena Yagi diseñada (445MHz).	1
Antena Yagi diseñada (145MHz).	1

Líneas de transmisión (RG-58).	3
Radio kenwood TM-D700	1
Radio yaesu FT - 7800	1
Vatímetro & SWR (Diamond),	1

Con el Vatímetro & SWR (Diamond), se mide la potencia transmitida, potencia reflejada y la relación de onda estacionaria. El objetivo es conseguir que el sistema tenga un máximo acoplamiento de impedancias.

Utilizando estos datos (potencia reflejada y transmitida y SWR) se reemplaza en la siguiente ecuación para determinar el coeficiente de reflexión:

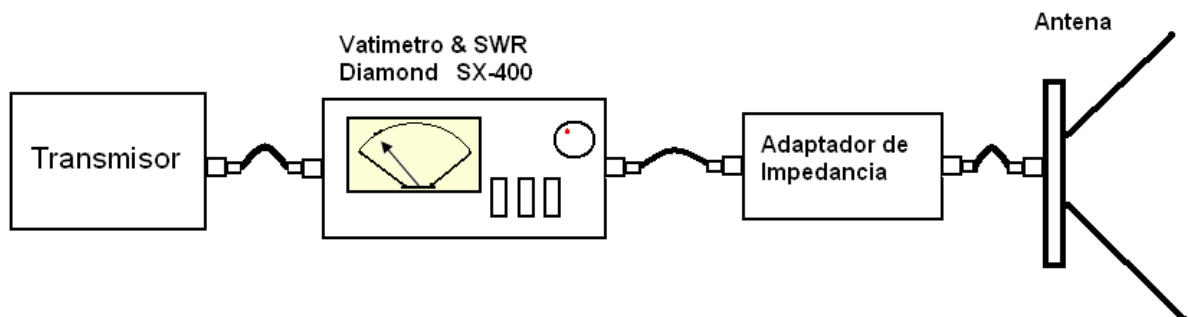
$$\Gamma = \frac{SWR - 1}{SWR + 1} \quad \text{Ec 3.1}$$

Después de hallar el coeficiente de reflexión es posible determinar la impedancia de la antena, con la siguiente ecuación:

$$Z_{ANT} = Z_0 \cdot \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Es importante tener en cuenta que en la anterior ecuación no se consideran las pérdidas por línea de transmisión, por lo que su valor es aceptable para distancias muy cortas de cable, por eso la línea de transmisión para esta prueba tiene una distancia aproximada de 1m. El esquema de conexión para medir SWR se muestra en la siguiente figura:

Figura 41. Esquema de conexión para medir SWR



Es recomendable transmitir a baja potencia para evitar dañar las entrada/salida del radio, en caso de que el SWR sea muy alto.

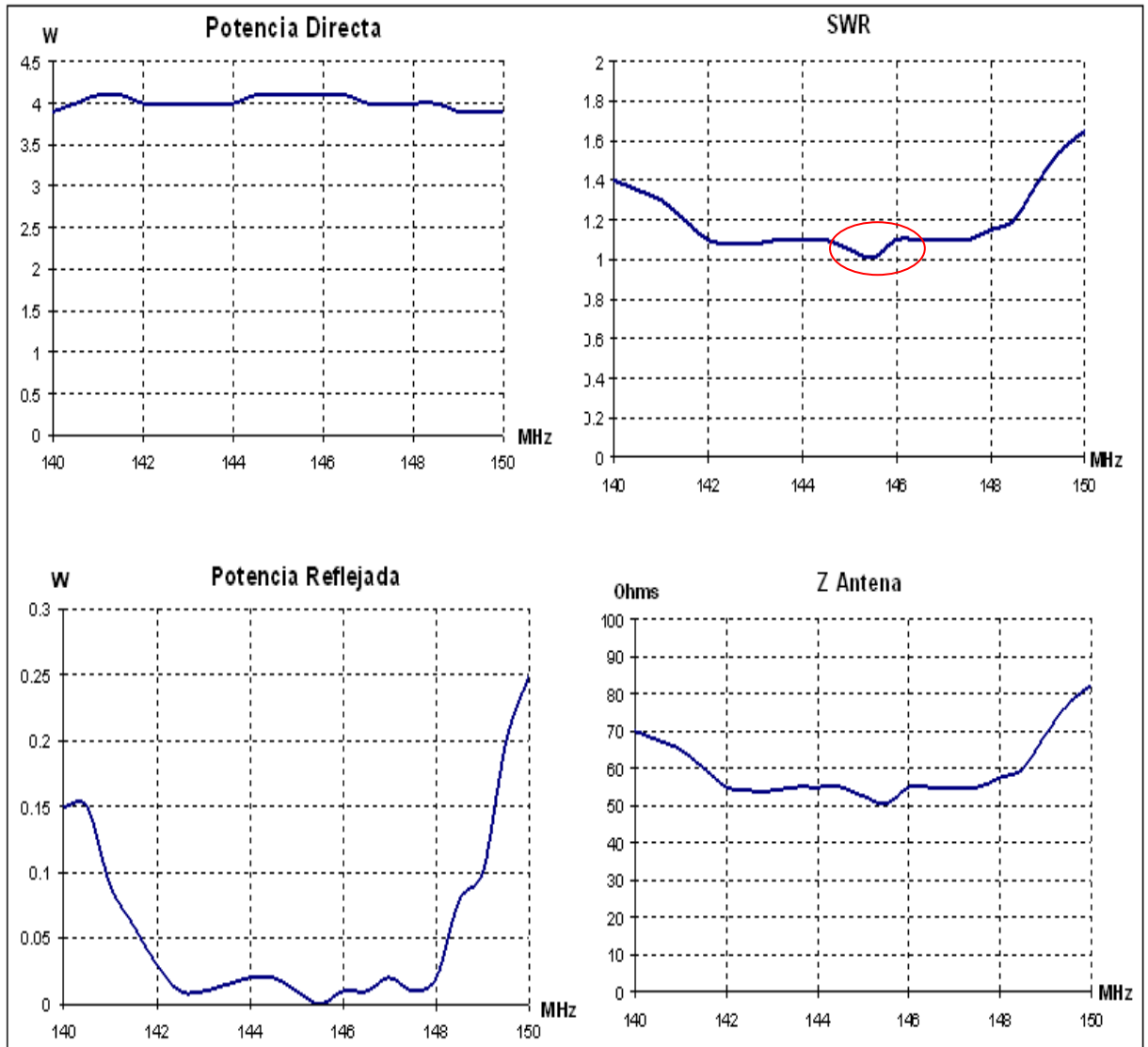
A continuación se muestran los resultados de las mediciones de los parámetros de acoplamiento de la antena:

Cuadro 16. Resultados obtenidos a partir de la medición del SWR para la antena Cushcraft 13B2

<b>VHF Polarización horizontal.</b>						
<b>Frecuencia (MHz)</b>	<b>Potencia Directa (W)</b>	<b>Potencia Reflejada (W)</b>	<b>SWR</b>	<b>Cof. Reflexión</b>	<b>Zo <math>\Omega</math></b>	<b>Zant <math>\Omega</math></b>
140	3,9	0,15	1,4	0,16667	50	70
140,5	4	0,15	1,35	0,14894	50	67,5
141	4,1	0,09	1,3	0,13043	50	65
141,5	4,1	0,06	1,2	0,09091	50	60
142	4	0,03	1,1	0,04762	50	55
142,5	4	0,01	1,08	0,03846	50	54
143	4	0,01	1,08	0,03846	50	54
143,5	4	0,015	1,1	0,04762	50	55
144	4	0,02	1,1	0,04762	50	55
144,5	4,1	0,02	1,1	0,04762	50	55
145	4,1	0,01	1,05	0,02439	50	52,5
145,5	4,1	0	1,01	0,00498	50	50,5
146	4,1	0,01	1,1	0,04762	50	55
146,5	4,1	0,01	1,1	0,04762	50	55
147	4	0,02	1,1	0,04762	50	55
147,5	4	0,01	1,1	0,04762	50	55
148	4	0,02	1,15	0,06977	50	57,5
148,5	4	0,08	1,2	0,09091	50	60
149	3,9	0,1	1,39	0,16318	50	69,5
149,5	3,9	0,2	1,55	0,21569	50	77,5
150	3,9	0,25	1,65	0,24528	50	82,5

Para facilitar la interpretación de los resultados, se muestran en la Figura 42 las graficas de potencia directa, reflejada, SWR e impedancia de la antena.

Figura 42. Grafica de los resultados obtenidos a partir de la medición del SWR para la antena Cushcraft 13B2



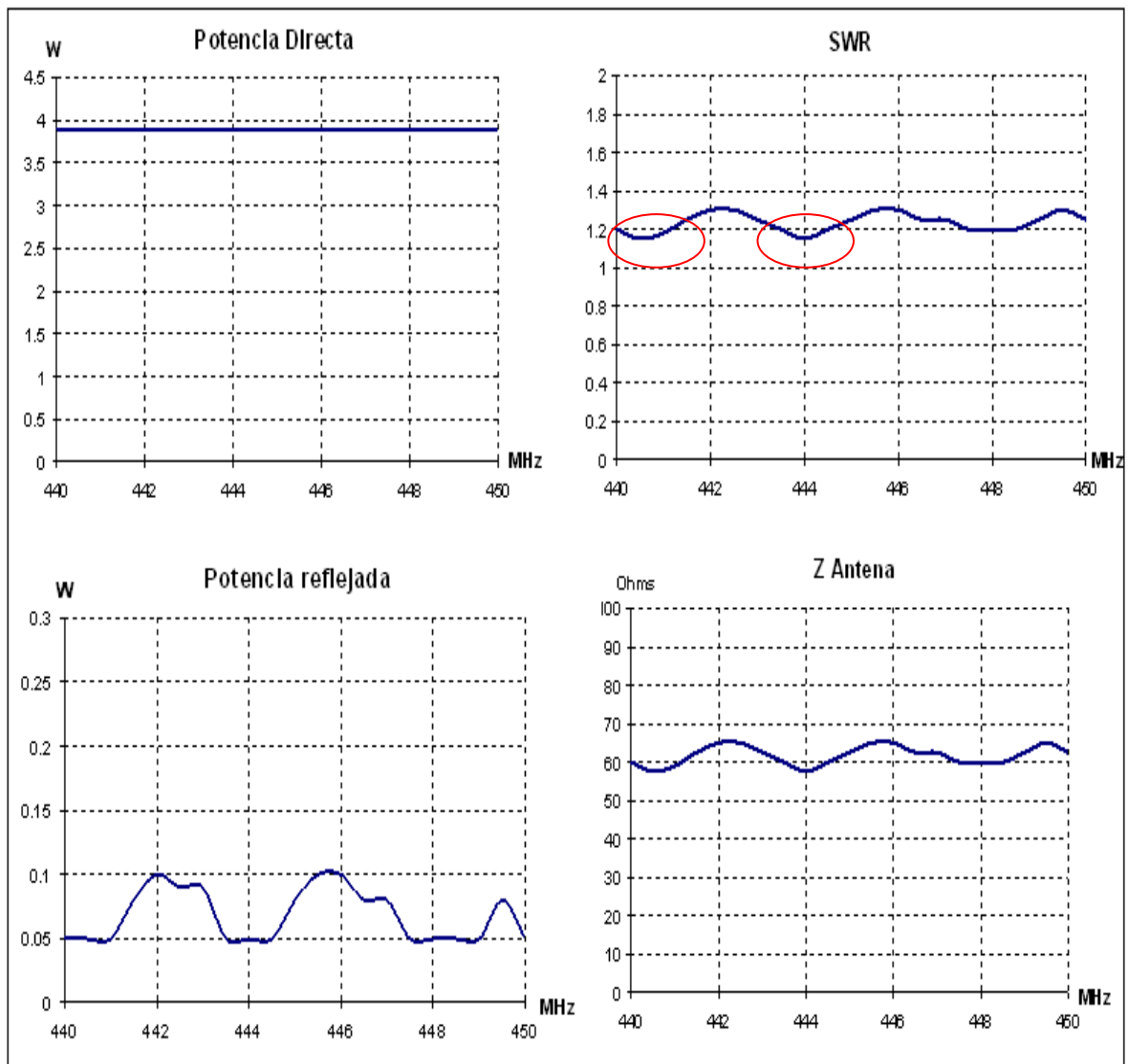
De acuerdo a los resultados obtenidos a partir de la medición del SWR para la antena Cushcraft 13B2, se puede establecer que el mejor acople de impedancia del sistema con la antena se presenta cuando se trabaja en un rango de frecuencias entre 145 y 146 MHz, ya que las impedancias de la línea de transmisión y la antena se igualan logrando la máxima transferencia de potencia del sistema hacia el espacio libre.

El comportamiento de la potencia directa se debe a las características propias de sintetizador de frecuencias del radio ya que para las potencias más altas significa que la frecuencia escogida se acerca a las armónicas de la frecuencia de oscilacion de sintetizador.

Cuadro 17. Resultados obtenidos a partir de la medición del SWR para la antena Cushcraft A44911S

<b>Frecuencia (MHz)</b>	<b>Potencia directa (W)</b>	<b>Potencia reflejada (W)</b>	<b>SWR</b>	<b>Cof. Reflexión</b>	<b>Zo <math>\Omega</math></b>	<b>Zant <math>\Omega</math></b>
440	3,9	0,05	1,20	0,09091	50	60
440,5	3,9	0,05	1,15	0,06977	50	57,5
441	3,9	0,05	1,18	0,08257	50	59
441,5	3,9	0,08	1,25	0,11111	50	62,5
442	3,9	0,10	1,30	0,13043	50	65
442,5	3,9	0,09	1,30	0,13043	50	65
443	3,9	0,09	1,25	0,11111	50	62,5
443,5	3,9	0,05	1,20	0,09091	50	60
444	3,9	0,05	1,15	0,06977	50	57,5
444,5	3,9	0,05	1,20	0,09091	50	60
445	3,9	0,08	1,25	0,11111	50	62,5
445,5	3,9	0,10	1,30	0,13043	50	65
446	3,9	0,10	1,30	0,13043	50	65
446,5	3,9	0,08	1,25	0,11111	50	62,5
447	3,9	0,08	1,25	0,11111	50	62,5
447,5	3,9	0,05	1,20	0,09091	50	60
448	3,9	0,05	1,20	0,09091	50	60
448,5	3,9	0,05	1,20	0,09091	50	60
449	3,9	0,05	1,25	0,11111	50	62,5
449,5	3,9	0,08	1,30	0,13043	50	65
450	3,9	0,05	1,25	0,11111	50	62,5

Figura 43. Gráfica de resultados obtenidos a partir de la medición del SWR para la antena Cushcraft A44911S

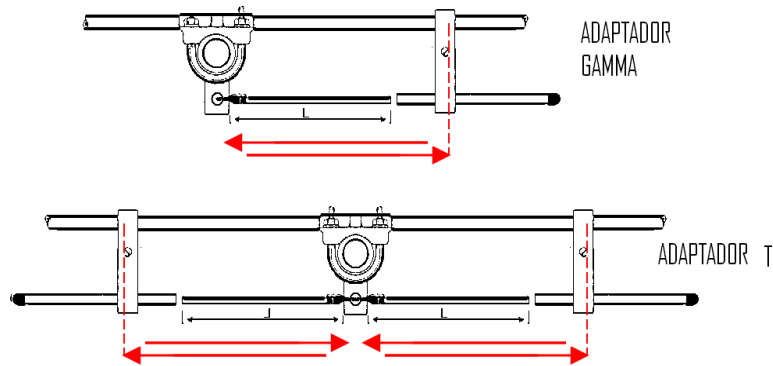


De acuerdo a los resultados obtenidos a partir de la medición del SWR para la antena Cushcraft A44911S, se pudo establecer que el mejor acople de impedancia del sistema con la antena se presenta cuando se trabaja en 440.5 y 444 MHz, ya que las impedancias de la línea de transmisión y la antena tienen valores semejantes, logrando la máxima transferencia de potencia del sistema hacia el espacio libre.

El resultado de que la potencia directa sea una línea recta indica que las variaciones en el acople de impedancias para ese rango de frecuencias no es significativo, esto se puede comprobar observando los valores tan pequeños entre los que varía de la potencia reflejada.

Una vez se ha obtenido el comportamiento de la relación de onda estacionaria en las bandas de operación de la antena, se hace necesario ajustar el adaptador de impedancia de la antena y tratar de conseguir un SWR cercano a 1. Cabe aclarar que los ajustes al adaptador son el cambio de posición de los elementos móviles como muestra la Figura 44. La antena de la banda de 144 MHz tiene un adaptador tipo T en complemento con un balun y la antena de la banda de 440MHz tiene un adaptador tipo gamma.

Figura 44. Adaptadores tipo T y GAMMA



Para lograr el mejor acople de impedancias de las otras antenas se siguió el mismo procedimiento descrito.

#### 4.2 MEDICIÓN DEL PATRÓN DE RADIACIÓN

El diagrama de radiación de una antena es una herramienta muy útil para el análisis de las características de una antena. Con él se puede conocer de una forma clara y sencilla como radia una antena, permite deducir su directividad, ganancia, relación adelante-atrás y el ancho del haz<sup>19</sup>.

Cuadro 18. Materiales y equipos de la prueba para medir el patrón de radiación.

Materiales y Equipos		Cant.
Antena Yagi comercial “Cushcraft 13B2”	(145MHz).	1
Antena Yagi comercial “Cushcraft A44911S”	(440MHz).	1
Antena Yagi diseñada “Elementos sobre el boom”	(445MHz).	1
Antena Yagi diseñada “Elementos incrustados en el boom”	(445MHz).	1
Antena dipolo diseñado	(145MHz).	1
Líneas de transmisión (RG-58).		3
Radio kenwood TM-D700		1
Analizador de espectro “Motorola”		1

<sup>19</sup> Libro “Equipos electrónicos de consumo” autor: Juan Millán Esteller. Editorial Paraninfo.

El método para medir el patrón de radiación de las antenas, consistió en radiar con una antena de referencia fija, un tono continuo de 1750Hz que modulada la frecuencia central (436MHz y 145MHz) con una potencia de 10W y 5W, esto con el fin de que la potencia recibida por la antena de prueba (antena rotando) fuera homogénea.

La medición del diagrama de radiación depende del medio circundante. Por eso se instalaron las antenas en un espacio que no presentaba muchos obstáculos (campo de fútbol de la Universidad Surcolombiana), con el fin de evitar el problema de las ondas reflejadas que pudieran alterar las medidas.

Además, es importante aclarar que solamente se trató de medir la potencia irradiada (zona de campo lejano o Fraunhofer) y no la potencia reactiva (campo cercano). Por lo tanto, la distancia entre antenas se deduce a partir de la siguiente ecuación, en la cual empieza la zona de Fraunhofer.

$$r \geq 2D^2/\lambda \quad \text{Ec.3.3}$$

Donde:

r : Distancia entre las antenas.

D: Logitud del boom.

$\lambda$ : longitud de onda.

$$r \geq 2*(1.58\text{m})^2/0.6880\text{m} \geq 7.25 \text{ m} \quad \text{para UHF}$$

$$r \geq 2*(4.50\text{m})^2/2.069\text{m} \geq 19.57 \text{ m} \quad \text{para VHF}$$

La distancia a la que se colocaron las antenas fué 10m y 20m respectivamente.

También fué necesario calcular la altura de las antenas para lograr la máxima transferencia de potencia del transmisor hacia el receptor evitando la reflexión de la señal con el piso (primera zona de Fresnel) Ecuación 3.4.

$$r = 17,32 * \sqrt{(d/4f)} \quad \text{Ecu. 3.4}$$

Donde:

**d** = distancia entre transmisor y receptor [m]

**f** = frecuencia [MHz]

**r** = radio [m]

$$r_{145\text{MHZ}} = 3.21 \text{ m}$$

$$r_{436\text{MHZ}} = 1.85 \text{ m}$$

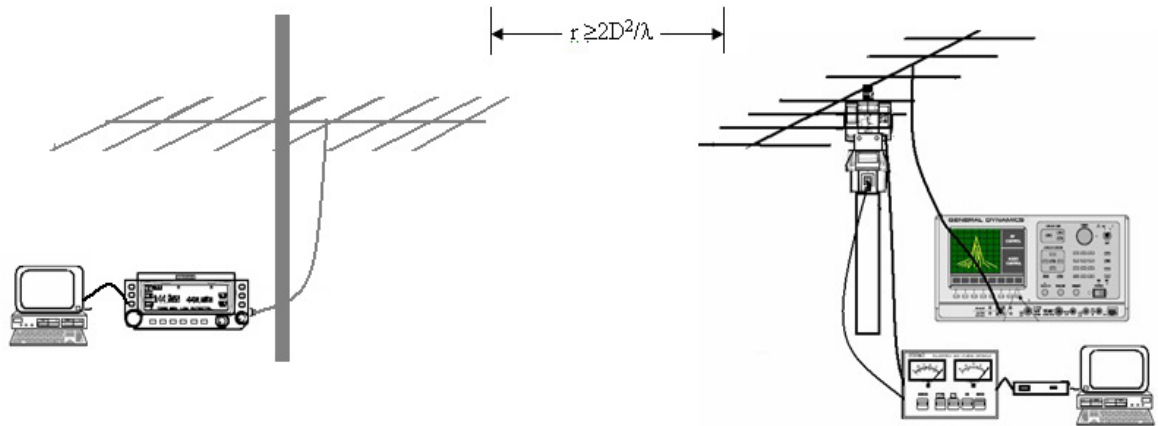
La altura a la que se colocaron las antenas fué de 3.5m y 2.40m respectivamente.

Aunque se hicieron medidas del patrón de radiación en la azotea del bloque de ingeniería de la Universidad, se encontró que la estructura de concreto alrededor de la antena de



prueba reflejaba la señal transmitida produciendo pérdidas de potencia, vistas como cambios abruptos en el diagrama del patrón de radiación. De hay la necesidad de realizarla en el campo de fútbol.

Figura 45. Esquema de medición del patrón de radiación

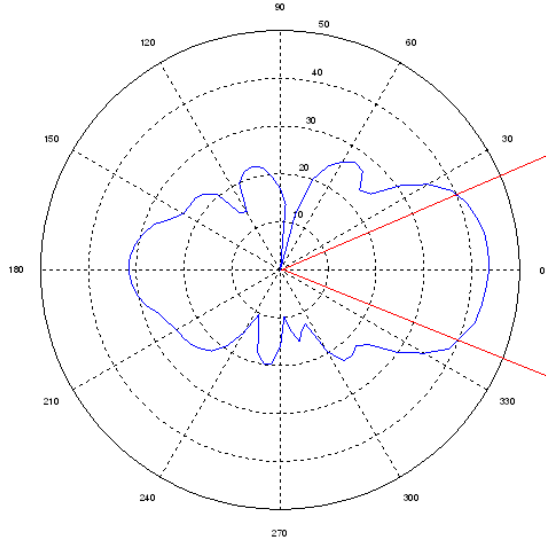


El montaje de la prueba (Figura 45) consta de dos partes, una de control y otra de comunicaciones. En el control se hizo un programa que enviara comandos al rotor a través de la interface (GS232B) y el control (G 5500), para que se moviera cada  $5^\circ$  en azimut.

El sistema de comunicaciones se conforma por una parte transmisora y otra receptora. La parte transmisora consta de un transceptor Kenwood que transmite en las bandas de VHF y UHF y una antena (ganancia=15 dBi) conectada a través de la línea de transmisión (LMR-400); se utilizó un computador para activar por comandos el envío de un tono. La parte receptora está conformada por una antena (con parámetros desconocidos) conectada al analizador de espectro por medio de una línea de transmisión (LMR-400); se evitó conectar otro elemento entre estos dos dispositivos, pues pueden alterar la medición. La prueba se realizó en intervalos de 10 minutos para evitar el sobrecalentamiento del radio.

Para visualizar el patrón de radiación se utilizaron graficas polares de Matlab y fué necesario pasar los valores de potencia (dBm) negativos a positivos.

Figura 46. Patrón de radiación real de la antena elementos sobre el boom.

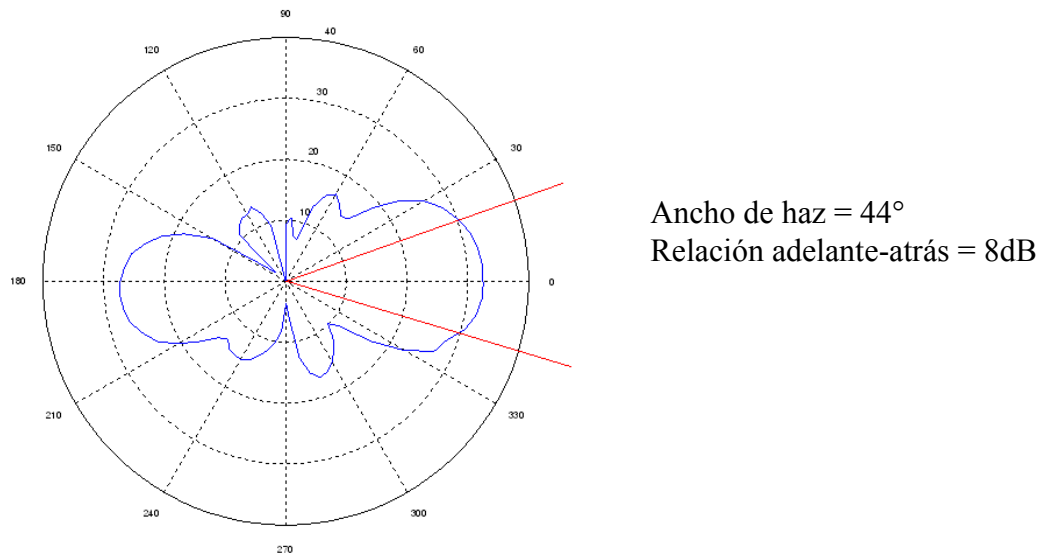


Ancho de haz = 50°  
 Relación adelante-atrás = 12dB

Cuadro 19. Condiciones de la prueba para la antena elementos sobre el boom.

CONDICIONES DE LA PRUEBA	
Fecha	30/07/2008
Hora	03:10 p.m.
Lugar de la prueba	Cancha de futbol USCO
Distancia entre antenas	10 metros
Altura de las antenas	2.40 metros
Frecuencia	436.050 MHz
Transmisor	Radio Kenwood TM D-700
Potencia de transmisión	Media = 10W
Antena de transmisión	Comercial Cushcraft A44911S
Ganancia antena de transmisión	15.6dBi
Receptor	Analizador de espectro
Antena receptora	Antena elementos sobre el boom

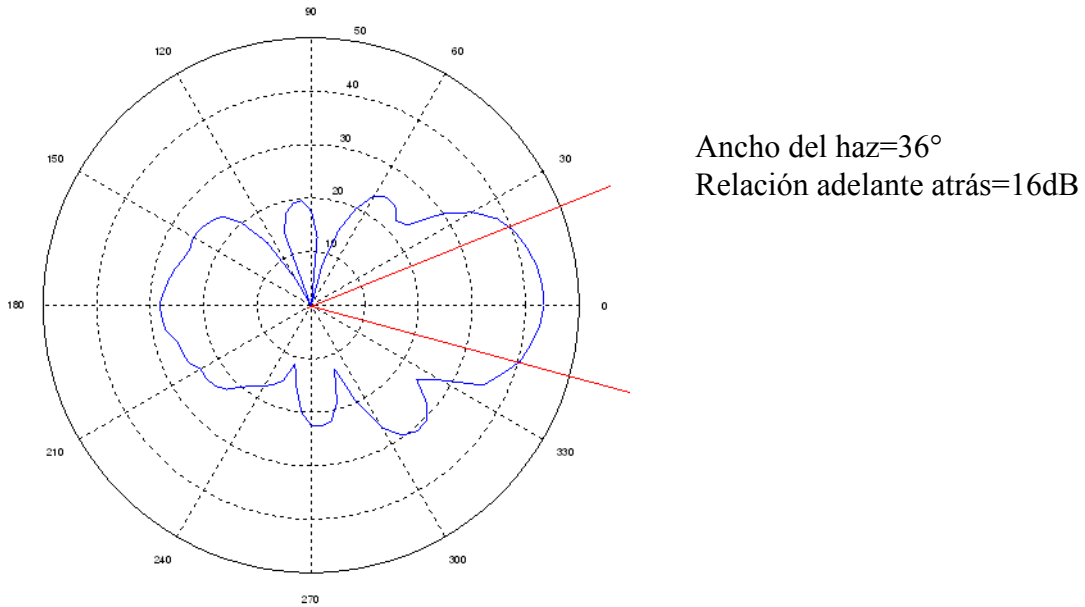
Figura 47. Patrón de radiación real para antena de elementos incrustados en el boom.



Cuadro 20. Condiciones de la prueba para la antena de elementos incrustados en el boom.

CONDICIONES DE LA PRUEBA	
Fecha	30/07/2008
Hora	03:10 p.m.
Lugar de la prueba	Cancha de futbol USCO
Distancia entre antenas	10 metros
Altura de las antenas	2.40 metros
Frecuencia	436.050 MHz
Transmisor	Radio Kenwood TM D-700
Potencia de transmisión	Media = 10W
Antena de transmisión	Comercial Cushcraft A44911S
Ganancia antena de transmisión	15.6dBi
Receptor	Analizador de espectro
Antena receptora	Antena incrustados en el boom

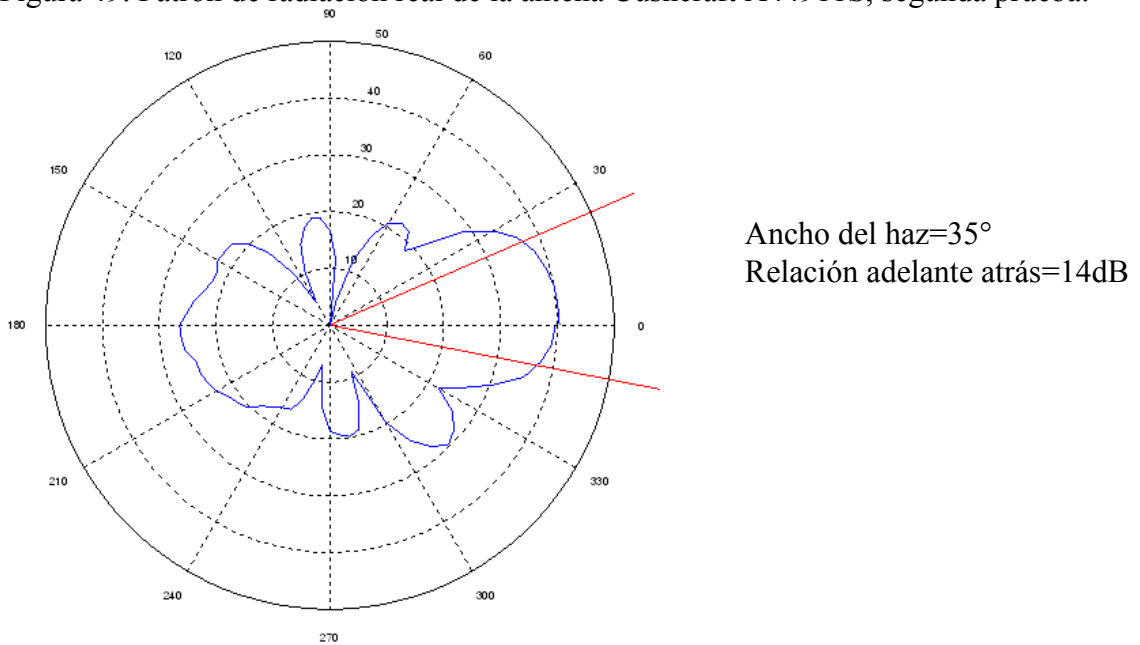
Figura 48. Patrón de radiación real de la antena Cushcraft A44911S, primera prueba.



Cuadro 21. Condiciones de la primera prueba para la antena Cushcraft A44911S.

CONDICIONES DE LA PRUEBA	
Fecha	30/07/2008
Hora	05:10 p.m.
Lugar de la prueba	Cancha de futbol USCO
Distancia entre antenas	10 metros
Altura de las antenas	2.40 metros
Frecuencia	436.050 MHz
Transmisor	Radio Kenwood TM D-700
Potencia de transmisión	Media = 10W
Antena de transmisión	Antena elementos sobre el boom
Receptor	Analizador de espectro
Antena receptora	Comercial Cushcraft A44911S
Ganancia antena de recepción	15.6dBi

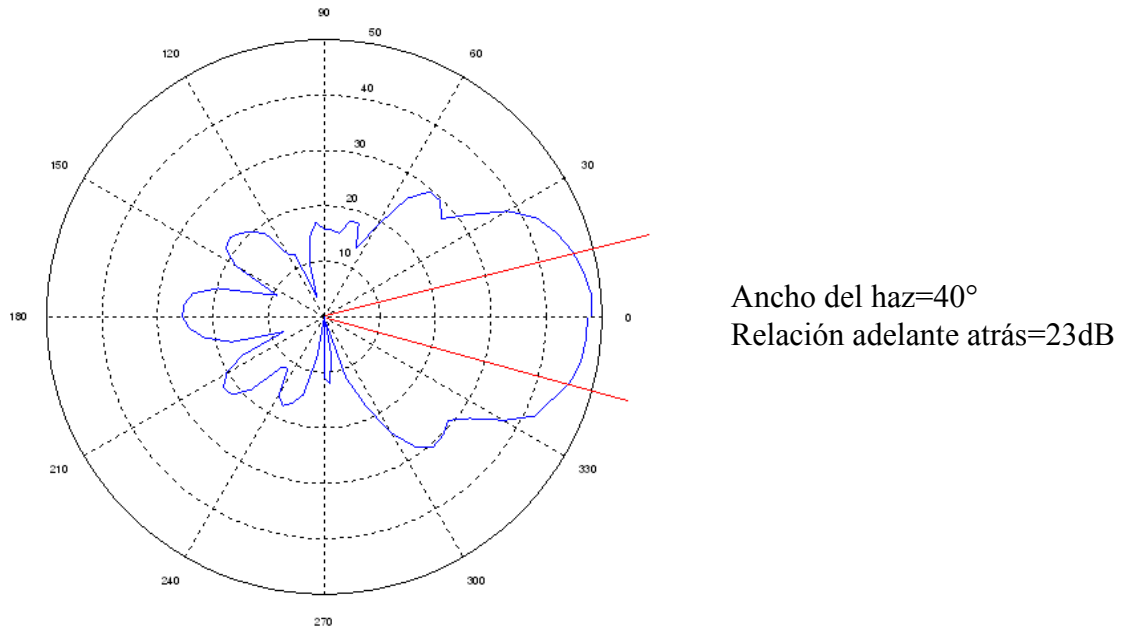
Figura 49. Patrón de radiación real de la antena Cushcraft A44911S, segunda prueba.



Cuadro 22. Condiciones de la segunda prueba para la antena Cushcraft A44911S.

CONDICIONES DE LA PRUEBA	
Fecha	30/07/2008
Hora	6:20 p.m.
Lugar de la prueba	Cancha de futbol USCO
Distancia entre antenas	10 metros
Altura de las antenas	2.40 metros
Frecuencia	436.050 MHz
Transmisor	Radio Kenwood TM D-700
Potencia de transmisión	Media = 10W
Antena de transmisión	Antena elementos incrustados en el boom
Receptor	Analizador de espectro
Antena receptora	Comercial Cushcraft A44911S
Ganancia antena de recepción	15.6dBi

Figura 50. Patrón de radiación real de la antena Cushcraft 13B2

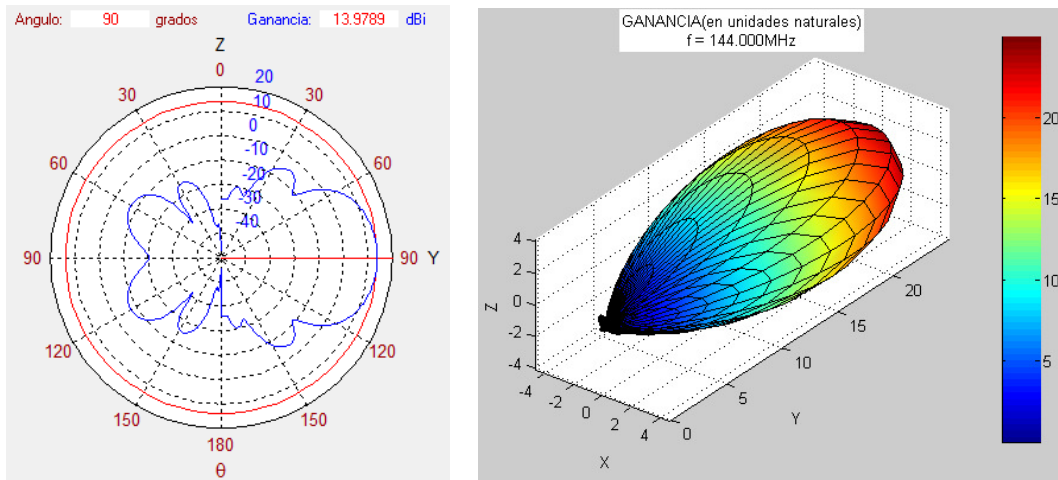


Cuadro 23. Condiciones de la prueba para la antena Cushcraft 13B2

CONDICIONES DE LA PRUEBA	
Fecha	30/07/2008
Hora	09:00 p.m.
Lugar de la prueba	Cancha de futbol USCO
Distancia entre antenas	20 metros
Altura de las antenas	3.5 metros
Frecuencia	436.050 MHz
Transmisor	Radio Kenwood TM D-700
Potencia de transmisión	Media = 5W
Antena de transmisión	Dipolo
Receptor	Analizador de espectro
Antena receptora	Comercial Cushcraft 13B2
Ganancia antena de recepción	15.6dBi

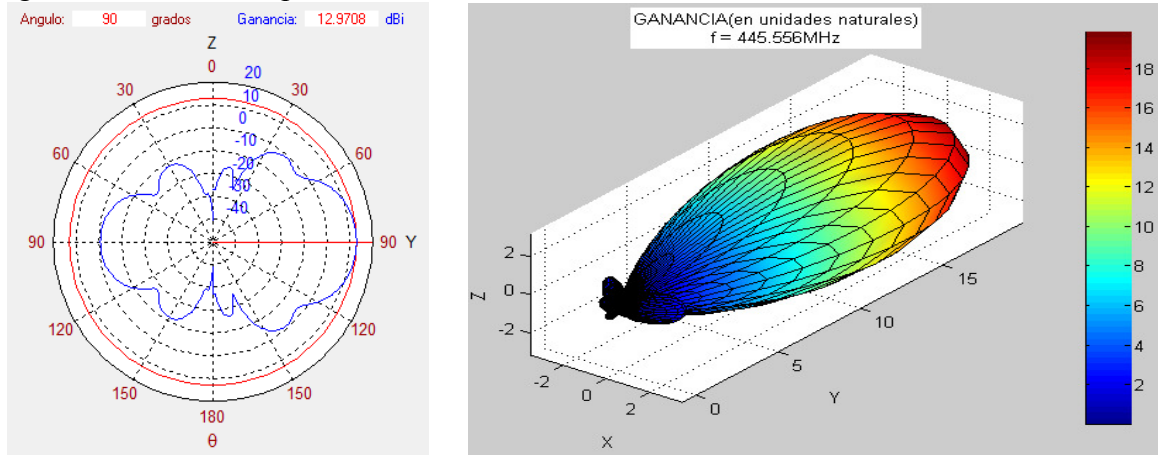
Fué necesario hacer una validación que consistió en comparar los resultados obtenidos en la práctica y los simulados, debido a que el fabricante no provee el patrón de radiación, se simularon las antenas en el programa ANDREA.

Figura 51. Grafica del patrón de radiación. Simulación 144MHz



Frecuencia = 144MHz  
Ganancia= 13.9789 dBi  
Ancho del Haz (-3dB) = 30°  
Relación adelante-atrás = 21.15dB

Figura 52. Grafica del patrón de radiación. Simulación 445MHz



Frecuencia = 445MHz  
Ganancia= 12.9708 dBi  
Ancho del Haz (-3dB) = 30°  
Relación adelante-atrás = 12dB

### 4.3 MEDICIÓN DE INTERFERENCIA

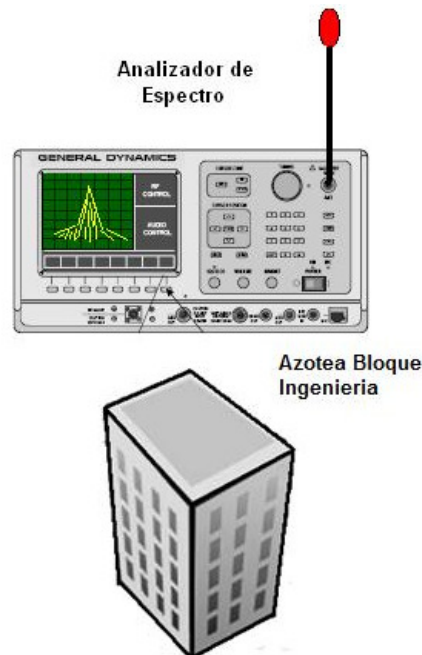
La prueba consiste en barrer el espectro en frecuencia para las bandas de 144MHz y 438MHz, de esta forma las señales presentes son registradas y almacenadas en una base de datos. En el registro se especifica la fecha, hora, potencia recibida, frecuencia central y ancho de banda. Estas pruebas de interferencia se han estado tomando periódicamente desde el viernes 14 de marzo de 2008 hasta la fecha.

Los equipos para hacer las pruebas han sido instalados en la azotea del cuarto piso, sitio donde están las antenas de la Estación.

A medida que se fué profundizando en el estudio de interferencias, el proceso de medición se ha realizado de la siguiente manera:

Al comienzo se estudió el espectro y se tomaron medidas únicamente con el analizador de espectro utilizando su antena monopolo, que tiene las características de baja ganancia y es omnidireccional como se observa en la Figura 52.

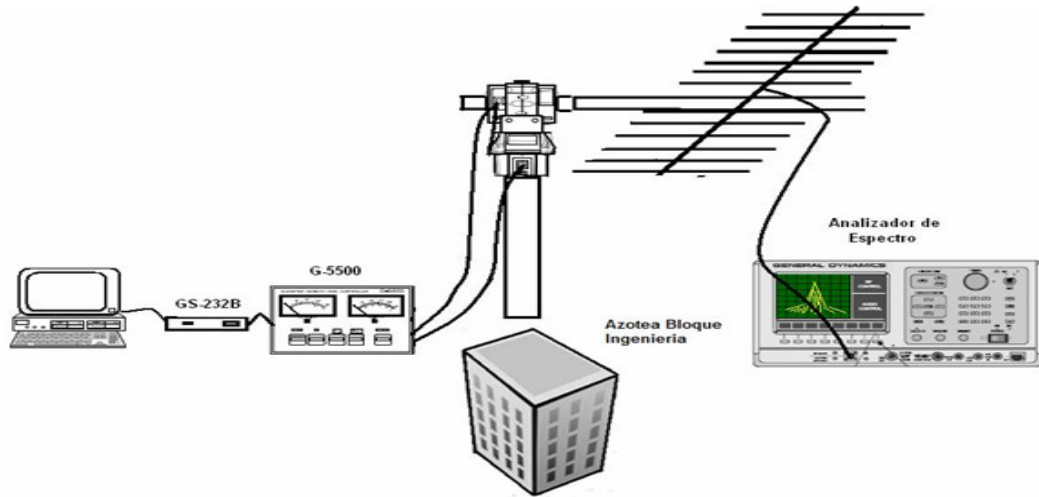
Figura 53. Esquema de medición interferencias con el analizador de espectro.



Luego, se necesitó dar la directividad al sistema de comunicaciones anterior utilizando una antena yagi, además se adicionó el sistema de control para mover la antena cada  $5^\circ$ . Con esta configuración se logró medir más señales de interferencia y determinar la dirección como se observa en la Figura 53.

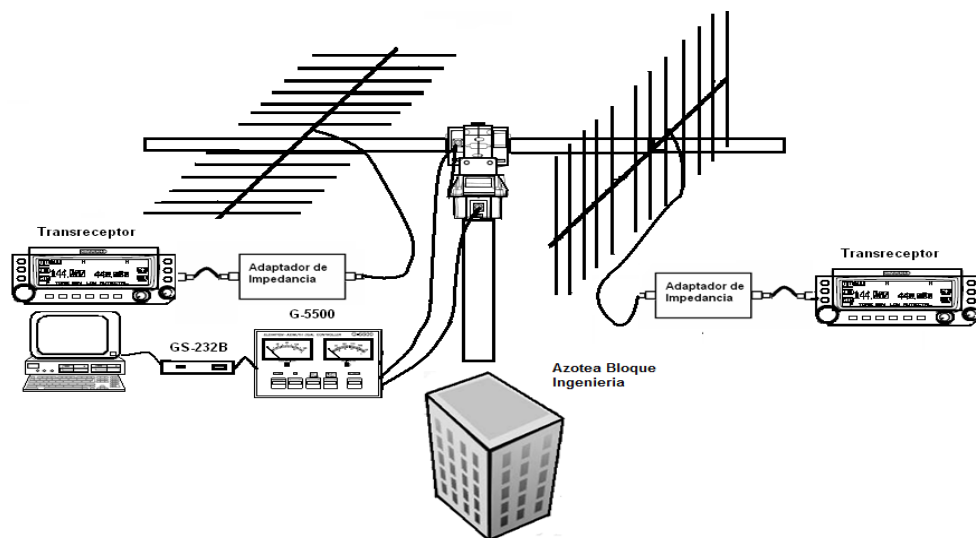


Figura 54. Esquema de medición de interferencia utilizando el analizador y el rotor.



Los dos sistemas anteriores presentaban falencias, pues, la sensibilidad del analizador de espectro es de  $2\mu\text{V}$ ; además este instrumento solo puede analizar una sola señal. Para solucionar este problema fue necesario conectar al sistema los radios (Kenwood), ya que éstos tienen una sensibilidad de  $0.16\mu\text{V}$ , característica apropiada para medir interferencias de baja potencia, como la enviada por el satélite (ver Figura 54). Una ventaja adicional de trabajar con los dos radios, es que se puede obtener dos señales simultáneamente, una para la polarización vertical y otra horizontal, lo que facilita la identificación de la polarización y la dirección de las señales de interferencia. Debe tenerse en cuenta que el nivel de squelch de los radios fue de tres para la banda de  $438\text{MHz}$  y siete para la banda de  $144\text{MHz}$ .

Figura 55. Esquema de medición de interferencia utilizando dos radios y el rotor.



Las figuras que se exponen a continuación muestran las señales registradas durante el estudio de interferencias en el rango de frecuencias que utiliza la Estación.

Figura 56. Frecuencias registradas desde 143.5 hasta 146MHz.

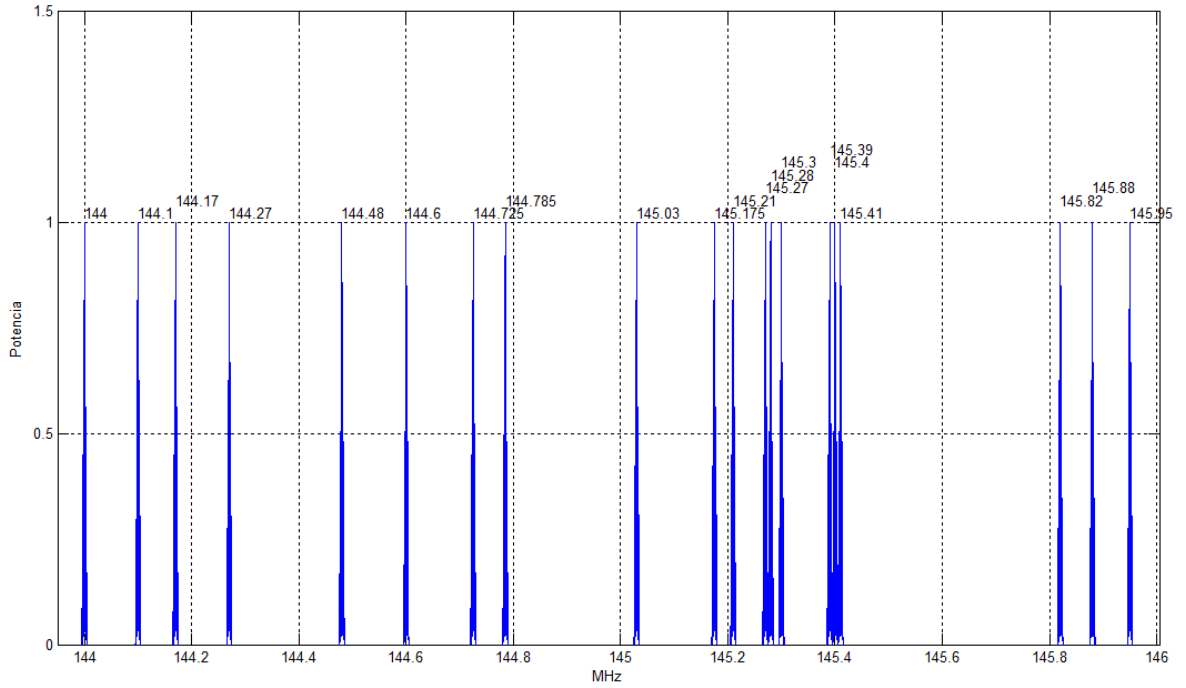
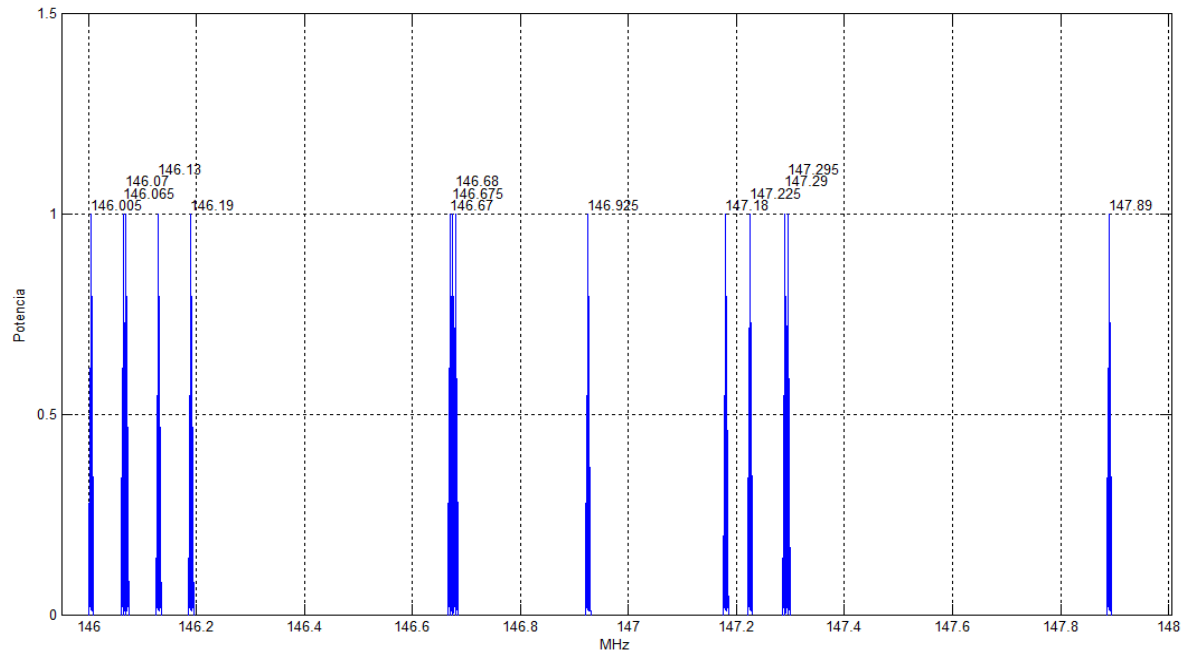


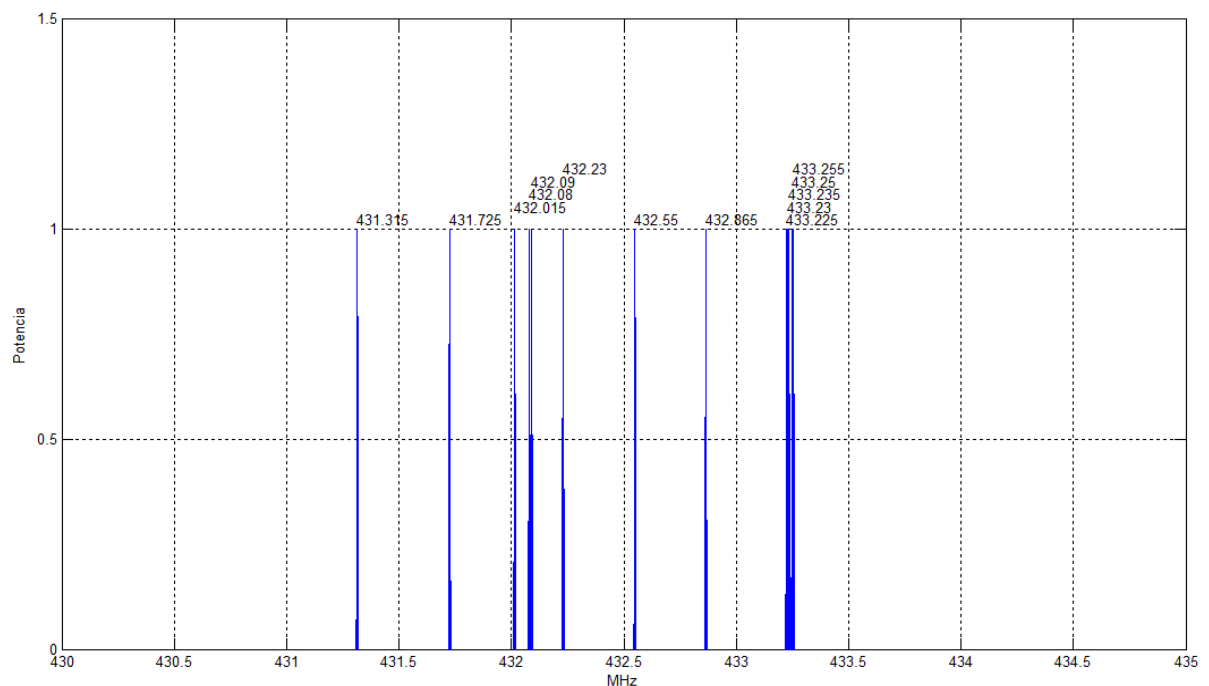
Figura 57. Frecuencias registradas desde 146 hasta 148MHz.



Ya que el objetivo es encontrar todas las señales en esta banda que pueden causar interferencia, y debido a que con el radio no se puede establecer el nivel de potencia que tienen las señales encontradas, se toma como nivel umbral 1, es decir todas las señales que capte el radio se consideraran como posibles interferencias. Además, hay que considerar el mínimo nivel de squelch que permita hacer el barrido de frecuencias ya que se debe garantizar que todas las señales que interfieren sean registradas para lograr establecer parámetros que limitan la comunicación.

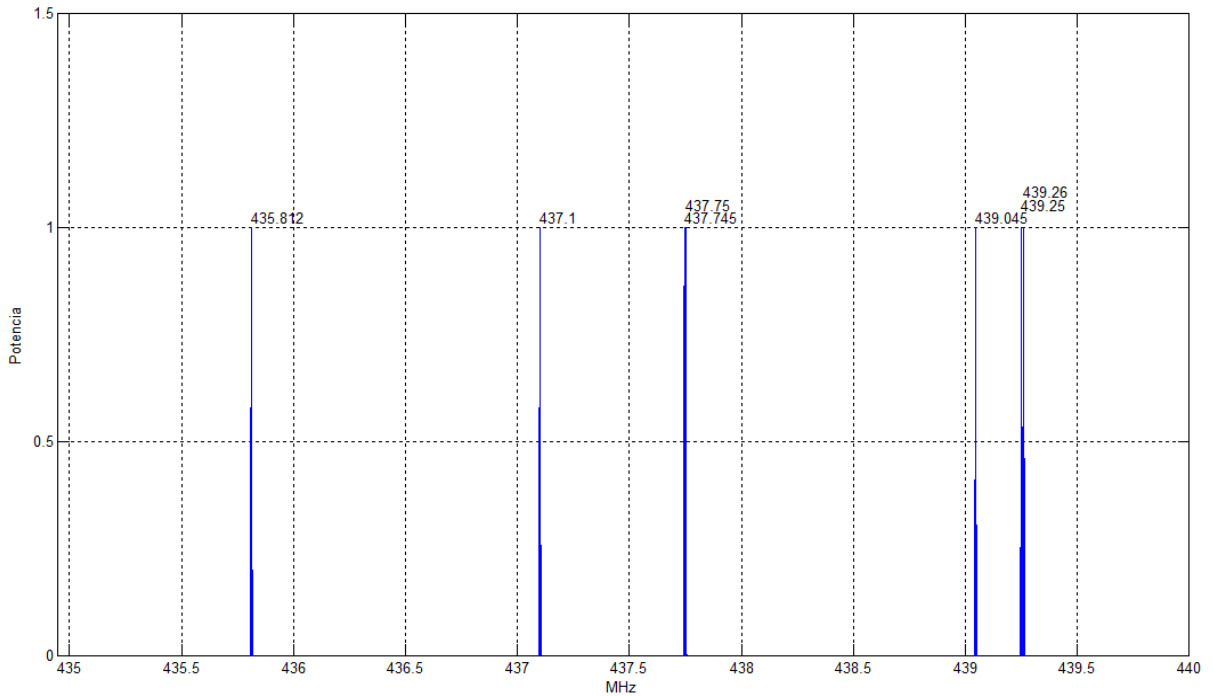
El estudio muestra que el máximo número de señales se encuentran desde 145 a 145.5 MHz y desde 146 a 146.2 MHz. Sin embargo, para esta banda de frecuencia estas interferencias no son tan críticas, debido a que es la banda de transmisión de la estación terrena y se puede solucionar el problema de interferencia aumentando un poco el nivel de la potencia de transmisión hasta el tope límite que tenga reglamentado el Ministerio de Comunicaciones.

Figura 58. Frecuencias registradas desde 430 hasta 435MHz.



Para la banda de UHF, las medidas se realizaron con un squelch de 3 para tratar de encontrar todas las posibles señales que pueden afectar la recepción en la estación terrena. El estudio muestra que el número máximo de señales que pueden causar interferencia en la recepción, se encuentran entre 431 y 433.5 MHz. Sin embargo, se ha observado que la mayoría de satélites de órbita baja transmiten en un rango de frecuencia de 435 a 438 MHz, y el estudio muestra que para este intervalo de frecuencias solo hay 4 señales que pueden interferir, lo que facilita la selección de los filtros que se deben incluir en el sistema para garantizar una comunicación exitosa con el satélite.

Figura 59. Frecuencias registradas desde 435 hasta 440MHz.



#### 4.4 RADIO ENLACE SATELITAL

Después de tener las características electromagnéticas de las antenas y del sistema de comunicaciones, el estudio de interferencia, la experiencia en el manejo de los equipos de comunicación, la ubicación correcta del rotor ( $0^{\circ}$  N), los predictores actualizados y sincronizados, el programa principal terminado (PROET) el cual permite el control automático del radio y rotor, el cálculo en tiempo real del enlace y que decodifica la información contenida en la señal Beacon, el siguiente paso consistió en integrar armónicamente cada uno de estos elementos, aunque se identificaron fallas como el cambio de movimiento brusco generado por el control al rotor, éstas fueron corregidas y afinadas.

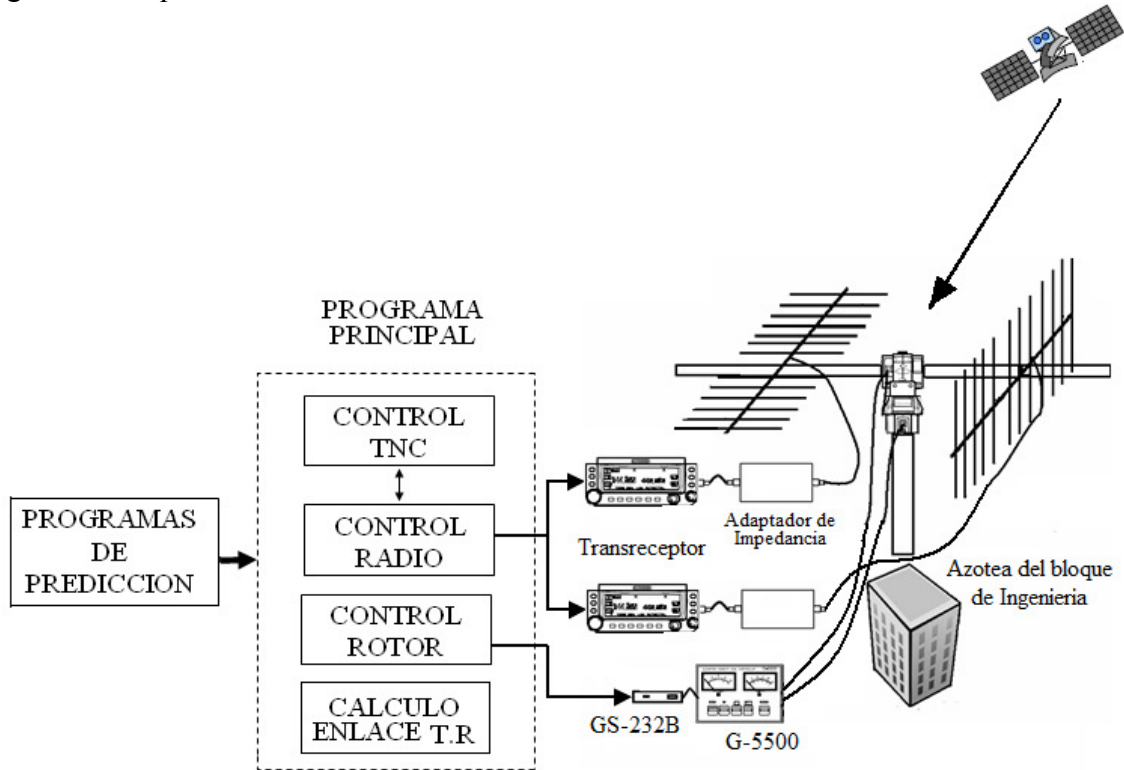
Después de la integración del sistema de la Estación terrena, se decidió identificar los satélites que cumplieran con requisitos y limitaciones en potencia y frecuencia del sistema.

Como primer seleccionado fué el RS-22, el cual es un satélite construido por la academia militar de Mozhaisky en St. Petersburg, Rusia, tiene una orbita LEO de 693 x 675km, transmite una señal Beacon a 435.3520 MHz modulada en CW, transmite datos de telemetría en 16 grupos de cinco a siete caracteres y el código es enviado con pausas de 10 segundos entre cada grupo.

Después de la selección e identificación, se hicieron simulaciones para evaluar el sistema tomando como referencia las trayectorias futuras que tuvieran cobertura sobre la estación y se encontró que era viable. Con todo el sistema listo se decidió apuntar las antenas hacia el

espacio exterior y empezar el rastreo de la trayectoria del RS-22, dando como resultado unas pruebas exitosas, pues se logró recibir la primera señal satelital en la Estación.

Figura 60. Esquema del sistema de la Estación Terrena USCO.



El procedimiento fué repetido con la mayoría de satélites radioaficionados y/o Cubesat. Sin embargo, se logró establecer comunicación con aquellos que transmitían a una potencia superior a 300mW, ya que a menores potencias el sistema actual no las puede detectar debido a sus limitaciones de sensibilidad. Por ello, se recomienda la utilización de etapas de amplificación (LNA), antenas con mayor ganancia (preferiblemente superior a 15dB) y radios con mejor sensibilidad que los actuales (0.16uV).

Cabe aclarar, que además de los requisitos de potencia anteriormente mencionados, las señales recibidas se encontraban en la banda de 430 a 439 MHz, pero algunas de éstas eran contaminadas por señales transmitidas en la cercanía de la estación, las cuales se encuentran registradas en el estudio de interferencia.

Los satélites con los que se ha logrado tener pruebas exitosas son: UO-22, AO-07, LO-19, RS-22, CO-57, y el CO-55.

A continuación se muestran algunas características de los satélites con los que se logró establecer comunicación y las condiciones del enlace en el momento de adquisición de señal (AOS) y pérdida de señal (LOS).

Cuadro 24. Pruebas de comunicación satelital de recepción.

SATÉLITE	DATOS		
UO - 22	Fecha	Junio 5 de 2008	
	Frecuencia	437,535 MHz	
	Potencia de Transmisión	300 mW	
	AOS	Tiempo (UTC)	18:18
		Azimut	136°
		Elevación	6°
		Doppler (Hz)	8217
		Distancia (Km)	2632
	LOS	Tiempo (UTC)	18:28
		Azimut	18°
		Elevación	6°
Doppler (Hz)		-8224	
Distancia (Km)		2603	

AO - 7	Fecha	Junio 5 de 2008	
	Frecuencia	435,100 MHz	
	Potencia de Transmisión	250 mW	
	AOS	Tiempo (UTC)	23:04
		Azimut	88°
		Elevación	14°
		Doppler (Hz)	738
		Distancia (Km)	3220
	LOS	Tiempo (UTC)	23:09
		Azimut	48°
		Elevación	13°
Doppler (Hz)		-1047	
Distancia (Km)		3323	

RS - 22	Fecha	Junio 6 de 2008		
	Frecuencia	435,350 MHz		
	Potencia de Transmisión	300 mW		
	AOS	Tiempo (UTC)	15:35	
		Azimut	213°	
		Elevación	5°	
		Doppler (Hz)	0	
		Distancia (Km)	2545	
	LOS	Tiempo (UTC)	15:43	
		Azimut	304°	
Elevación		5°		
Doppler (Hz)		0		
Distancia (Km)		2543		

LO - 19	Fecha	Junio 6 de 2008		
	Frecuencia	437,125 MHz		
	Potencia de Transmisión	750 mW		
	AOS	Tiempo (UTC)	21:54	
		Azimut	175°	
		Elevación	6°	
		Doppler (Hz)	9632	
		Distancia (Km)	2692	
	LOS	Tiempo (UTC)	22:06	
		Azimut	341°	
Elevación		6°		
Doppler (Hz)		-9613		
Distancia (Km)		2681		

CO - 57	Fecha	Junio 6 de 2008		
	Frecuencia	436,847 MHz		
	Potencia de Transmisión	100 mW		
	AOS	Tiempo (UTC)	22:27	
		Azimut	149°	
		Elevación	6°	
		Doppler (Hz)	9112	
		Distancia (Km)	2806	
	LOS	Tiempo (UTC)	22:39	
		Azimut	5°	
		Elevación	6°	
Doppler (Hz)		-9143		
Distancia (Km)		2781		

CO - 55	Fecha	Junio 6 de 2008		
	Frecuencia	436,837 MHz		
	Potencia de Transmisión	100 mW		
	AOS	Tiempo (UTC)	22:32	
		Azimut	150°	
		Elevación	6°	
		Doppler (Hz)	9151	
		Distancia (Km)	2797	
	LOS	Tiempo (UTC)	22:44	
		Azimut	4°	
		Elevación	6°	
Doppler (Hz)		-9181		
Distancia (Km)		2771		



Cuadro 25. Pruebas de comunicación satelital de recepción y transmisión.

AO - 51	Fecha	Agosto 22 de 2008		
	Frec. de Recepción	145,920 MHz		
	Frec. de Transmisión	435,300 MHz		
	Potencia de Transmisión	250 mW		
	AOS	Tiempo (UTC)	00:39	
		Azimut	194°	
		Elevación	2°	
		Doppler (Hz)	8801	
		Distancia (Km)	2925	
	LOS	Tiempo (UTC)	00:51	
		Azimut	323°	
		Elevación	2°	
Doppler (Hz)		-8768		
Distancia (Km)		2994		

## 5. CONCLUSIONES

Se logró establecer radioenlaces (simplex) entre la Estación Terrena USCO con algunos satélites de la red Cubesat y radioaficionados. Éstos consistieron en recibir en Tierra la señal beacon emitida por el satélite.

Se comprobó que la parte más crítica del radioenlace es recibir la señal que transmite el satélite, ya que la potencia en Tierra está alrededor de  $3,75 \times 10^{-18}$  (Atto) vatios y una SRN alrededor 7dB, siendo un nivel tan pequeño que es cercano al nivel de potencia del ruido. En contraste, con el nivel de potencia recibida en el satélite que está alrededor  $9.47 \times 10^{-15}$  (femto) vatios y una SRN alrededor de 24dB.

Se comprobó que para mejorar la comunicación entre el satélite y la Estación, es necesario optimizar el sistema de comunicaciones en Tierra, ya que el sistema de comunicaciones en el satélite y los factores que determinan la potencia de la señal recibida como la distancia entre el satélite y la estación, las capas atmosféricas de la Tierra, las interferencias del medio y las condiciones ambientales son características y/o variables sobre las que no se pueden ejercer control.

Cuando las antenas de estación apuntan hacia el satélite con pocos grados (entre  $0^\circ$  y  $10^\circ$ ) de elevación, la señal recibida tiene la más baja potencia y demasiado ruido, esto se debe a las características del canal de comunicaciones y principalmente porque el satélite se encuentra a la distancia más alejada respecto a la estación, asimismo, los lóbulos laterales de la antena toman gran cantidad del ruido terrestre generado por fuentes que se encuentran en las proximidades de la estación como computadores, red eléctrica, entre otras; además, se suma el ruido cósmico generado por el Sol, estrellas y demás astros.

Se comprobó que es posible recibir en la estación señales de satélites utilizando antenas con polarización lineal. Pero, es importante aclarar que este tipo de polarización presenta pérdidas en potencia que están alrededor de 3dB, debido a que los vectores de campo eléctrico y magnético de la señal se acoplan parcialmente a la dirección instantánea del vector de los campos de la antena.

Con el fin de tener una base teórica firme para aplicar criterios de ingeniería en la implementación de la Estación Terrena, fué necesario volver a calcular el radioenlace, ya que el estudio previo (Diseño del sistema de comunicaciones de la estación terrena sede Neiva CUBESAT UD) presenta inconsistencias en el cálculo de los parámetros que caracterizan el canal de comunicaciones, tales como: la relación señal a ruido (S/N) y la energía de bit (Eb/No), ya que no se consideró de forma correcta la distancia máxima, el sistema de temperatura, la pérdida por polarización, pérdida por lluvias, pérdidas atmosféricas y las pérdidas por líneas de transmisión.

Debido a que las órbitas de los satélites cambian por diversos factores tales como la interacción con las fuerzas de gravedad entre la Tierra y la Luna, las fuerzas de arrastre y otras, es importante que periódicamente la base de datos de los programas de predicción que contiene los elementos orbitales de los satélites, sea actualizada para que funcionen correctamente, de lo contrario se tiene errores en el seguimiento real del satélite.

Se desarrolló una metodología para la caracterización de las antenas a través de la aproximación de sus patrones de radiación. Como resultado de las mediciones se encontraron algunas alteraciones abruptas posiblemente producidas por interferencias que se presentan durante la medición. Aunque se trató de medir siguiendo las recomendaciones técnicas, no se cuenta con una cámara anecoica que aisle la prueba de interferencias o ruido externo; por tal motivo, se obtuvo una caracterización aproximada.

Es posible transmitir desde la estación hacia los satélites en la banda de 144-148MHz y 435-440MHz, porque el estudio de interferencias realizado muestra que las señales que pueden interferir en el radioenlace de subida están en los rangos de 145 hasta 145.5 MHz y de 146 hasta 146.2 MHz. Estas interferencias no son tan críticas, debido a que es la banda de transmisión de la estación terrena y podemos solucionar el problema de interferencia aumentando el nivel de la potencia de transmisión hasta el tope límite que tenga reglamentado el Ministerio de Comunicaciones.

Dentro de los equipos que se proponen es importante enfatizar que la adición de un amplificador de bajo ruido (LNA) aumentará la sensibilidad del sistema de comunicaciones y permitirá recibir señales más débiles de satélites que se encuentren a mayor altura y/o transmitan a menor potencia. Pero debe tenerse en cuenta que el LNA incrementa la señal y el ruido en la misma proporción, por eso es importante mejorar e incluir en el sistema los filtros que acondicionen la señal recibida.

Se propone la integración de las funciones de TX y RX en un solo radio. Para esto, se recomienda usar un conmutador coaxial que permita alternar estas dos funciones, reduciendo la cantidad de equipos y con ello el presupuesto y espacio requeridos. Este conmutador coaxial adicionalmente permitirá invertir la polaridad de la señal cuando el satélite pase por el punto de elevación  $90^\circ$ .

De acuerdo a las pruebas y a la experiencia adquirida en el manejo de los equipos, dispositivos e instrumentos, se encontró que presentan algunos inconvenientes como en el caso de los radios (Kenwood TM-D700 –Yaesu FT-7800), los cuales presentan la desventaja de que el mínimo paso en frecuencia es de 5KHz imposibilitando la compensación continua de frecuencia para corregir el corrimiento por Doppler. También se encontró que el vatímetro de línea y el analizador de espectro no tienen la sensibilidad adecuada para medir los bajos niveles de potencia recibida.

Se concluye que el software PROETusco 1.0 realizado durante el desarrollo de este trabajo de grado, es una herramienta indispensable para el funcionamiento de la Estación USCO, porque permite controlar automáticamente las funciones de los radios, la posición del

rotor, guardar y procesar la señal recibida (BEACON) y calcular los parámetros característicos del enlace. Aunque existen programas que realizan algunas de estas funciones de forma independiente, el reto fué lograr desarrollar e integrar éstas en un solo software. Esto permitió que el sistema fuera más eficiente, ya que el funcionamiento es armónico y sincronizado.

## 6. RECOMENDACIONES

### 6.1 LEGALES

Se recomienda obtener la licencia de radioaficionado que otorga el Ministerio de Comunicación para la Estación Terrena USCO. Los requisitos se muestran en el anexo b.

Se recomienda obtener ante las autoridades competentes como Policía Nacional, Ejercito, DAS u otra institución, los permisos para transmitir con los equipos de comunicación fuera de la Universidad.

### 6.2 ADQUISICIÓN DE EQUIPOS

Se recomienda que el diseño y nuevos desarrollos de hardware y software de la Estación Terrena sean flexibles y garanticen la compatibilidad con el sistema actual.

Se recomienda implementar un sistema de puesta a tierra y pararrayos para minimizar riesgos de corto circuitos y daños en los equipos de la Estación, teniendo en cuenta las especificaciones de ANSI/TIA/EIA-607.

Se recomienda adquirir transceptores con una sensibilidad menor de  $0.16\mu\text{V}$  y además, que tenga un paso de frecuencia en centenas de hertz para corregir apropiadamente el corrimiento por efecto Doppler. Se proponen transceptores como el ICOM 910 (permite la corrección automática de efecto Doppler) y Yaesu FT-870, ya que tiene un mínimo paso de frecuencia de 10Hz, ideales para corregir el efecto Doppler.

Se recomienda adquirir un amplificador de bajo ruido LNA con una ganancia mayor a **15dB** para adecuar los bajos niveles de potencia de la señal transmitida por algunos satélites. Se sugiere el LNA SP-7000, ya que trabaja en la banda 432/435MHz, tiene una figura de ruido  $NF= 0,9\text{dB}$ , ganancia ajustable en un rango de 10-20dB y el sistema de filtro es helicoidal.

### 6.3 UBICACIÓN

Por seguridad, la antena debe ubicarse en un lugar donde seres humanos o mascotas no transiten por el lóbulo principal del diagrama de radiación de dicha antena.

En caso de cambiar de lugar las antenas de la Estación, se recomienda hacer el estudio de interferencia de radiofrecuencias durante un tiempo mínimo de tres semanas antes de la instalación, esto servirá como elemento de juicio para decidir si el lugar es apropiado.

Para elegir el mástil y la torre donde estarán soportadas las antenas, se debe tener en cuenta el peso del rotor, de las antenas y la presión que ejerce el viento sobre la estructura y sus

elementos. La altura del mástil y la torre dependerá de las limitaciones de la topografía, edificios y árboles alrededor que no obstaculicen la línea de vista con el satélite. También, es importante dejar libre el área de movimiento de la antena, pues éstas tienen una longitud entre 2m a 10m y se mueve en azimut  $0^{\circ}$  a  $360^{\circ}$  y en elevación de  $0^{\circ}$  a  $180^{\circ}$ .

## **6.4 PRUEBAS**

Se recomienda escanear periódicamente (2 veces por semana en diferentes horas del día) el espectro en frecuencia para las bandas de 144MHz y 438MHz, utilizando el esquema de medición de interferencia con los dos radios y el rotor (Figura 54). Con el objetivo de identificar y registrar las señales que pueden causar interferencia.

Se recomienda diseñar, probar y caracterizar antenas de tipo helicoidal, yagi cruzada y fractal que tengan una ganancia mayor a 13 dB y un ancho de haz preferiblemente de  $30^{\circ}$ . Además, se debe tener en cuenta las pautas técnicas para el montaje de la prueba (Capítulo 4).

Aunque en este proyecto se logró establecer el radioenlace para la transmisión de datos entre dos estaciones en Tierra utilizando modulación FSK, protocolo AX.25 con el TNC incorporado en el transceptor TM-D700, se recomienda hacer pruebas de transmisión de datos entre la Estación Terrena y algún satélite que tenga repetidor de modulación digital y/o funciones de PacSat y ARPS (satélites AO-51, GO-32)

Se recomienda probar la transmisión de datos utilizando varios tipos de modulación digital (AFSK, FSK, QAM, GMSK) para la transmisión satelital de datos. Aunque algunos transceptores tienen un solo tipo de modulación digital para la transmisión de datos o no tienen, existen software que permiten modular digitalmente los datos en el PC, esta señal es enviada a través de la tarjeta de sonido hacia la entrada de audio del transceptor y viceversa. Ver ANEXO C.

## **6.5 EQUIPOS**

Los equipos de comunicaciones se deben ubicar en un sitio fijo, sobre una superficie plana para evitar que éstos queden inestables. Además, no se deben ubicar sobre otro dispositivo generador de calor (como una fuente de alimentación o un amplificador), como tampoco colocar sobre éstos libros, papeles u otros aparatos. También se debe evitar poner el transceptor en salidas de calefacción y las ventanas en donde podría exponer el equipo a la luz directa del sol en forma excesiva.

Se debe tener en cuenta que transmitir sin haber conectado primero la antena u otra carga equilibrada pueda dañar el equipo de comunicaciones. Es necesario conectar primero la antena al transceptor antes de transmitir. Se recomienda no transmitir a alta potencia durante períodos prolongados, pues el transceptor puede sobrecalentarse.

No coloque el transceptor en lugares excesivamente polvorientos, húmedos, mojados o sobre superficies inestables. Si detecta algún olor anormal o humo proveniente del transceptor, se debe apagar de inmediato.

## **6.6 PROGRAMA**

Aunque PROET se puede ejecutar en Windows Vista porque cuenta con los drivers necesarios, WinOrbit (uno de los tres programas de predicción utilizados) presenta un error al abrirlo; por tal motivo, se recomienda ejecutar el programa en Windows XP.

Se recomienda actualizar la base de datos de los satélites que tienen los programas de predicción cada tres meses aproximadamente. Una forma de hacerlo es actualizar la base de datos del WXtrack (Options->Update Keplers...), copiarla en Orbitron y en WinOrbit. Otra forma es bajar los archivos directamente de <http://www.celestrak.com/NORAD/elements/> y copiarlos en cada uno de los programas de predicción.

Es recomendable que desde el primer momento de ejecución de Orbitron se habilite el envío de datos a través de DDE (Configuración (Alt+F5) -> Extras-> Driver Autostart Rotor/Radio), para adquirir en todo momento los valores de azimut y elevación del satélite.

Como mejora para PROET se propone cambiar o mejorar su interface gráfica haciendo uso de las herramientas que ofrece el toolkit DSC de LabVIEW, con el fin de hacer gráfico el proceso de comunicación y el movimiento del satélite. Además se propone reducir el código fuente del programa utilizando SubVIs.

Con el objetivo de hacer autónomo el programa de la estación terrena (PROET), se propone implementar un programa de predicción en LabVIEW, que calcule y grafique las trayectorias de los satélites para cualquier órbita.

Como los comandos para manejar el TNC son estándar, se recomienda habilitar el programa para trabajar con cualquier TNC externo al radio.

Aunque se logró hacer el control del rotor con resultados satisfactorios utilizando la interface GS-232 y el control G-5500, se recomienda hacer el control sin estos dispositivos, ya que tienen una limitante de paso (1 paso  $\rightarrow$  1°), por lo tanto se propone hacer un controlador especializado (PID) utilizando LabVIEW, una vez se tengan los parámetros físicos y eléctricos de los motores de rotor.

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **LIBROS**

BARÁ TEMES, Javier. Circuitos de microondas con líneas de transmisión. Alfaomega Grupo Editor, S.A. Primera edición, 2000.

BLAKE, Roy. Sistemas electrónicos de comunicaciones. Segunda edición. International Thomson Editores, S.A. 2004.

ELBERT, Bruce R. The Satellite Communication Applications Handbook. Second Edition, 2004. Artech House.

----- . The Satellite Communication Ground Segment and Earth Station Handbook. Artech House, 2001.

ESTELLER, Juan Millán. Equipos electrónicos de consumo. Editorial Paraninfo.

FRENZEL, Louis E. Sistemas Electrónicos de Comunicaciones. Primera edición: México, abril 2003. Editorial McGraw Hill.

HANDBOOK ON SATELLITE COMMUNICATIONS. Third Edition, 2002. International Telecommunications Union, Geneva, Switzerland.

KRAUS, John D., MARHEFKA, Ronald J. Antennas For All Applications. Third Edition, 2003. Ed. Mc.Graw Hill.

HIPPOLITO, Louis J.Jr., Radiowave Propagation in Satellite Communications, Van Norstrand Reinhold Co., 1986.

MARAL, Gérard. SATELLITE COMMUNICATIONS SYSTEMS. System, Techniques and Technology. Fourth Edition. Jhon Wiley & Sons Ltd.

NERI VELA, Rodolfo. Comunicaciones por satélite. International Thomson Editores, S.A. 2003.

RAMIREZ ARTUNDUAGA, Jaime. Antenas, conceptos básicos simplificados de funcionamiento y diseño. Editorial Bonaventuriana. Primera edición, 2007.

RODDY, Dennis. Satellite communications. Ed. Mc.Graw Hill. Third edition.

SIERRA PÉREZ, Manuel. Electrónica de comunicaciones. Pearson Educación, S.A., Madrid, 2003.



TOMASY, Wayne. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. 4 ed. Prentice Hall. Mexico. 2003.

The ARRL Handbook For Radio Communications. Eighty Second Edition, 2005. Editor: Dana G. Reed, W1LC.

The ARRL ANTENNA BOOK. 20<sup>th</sup> Edition. Editor: R. Dean Straw, N6BV.

## **TESIS**

Diseño del sistema de control del desplazamiento y software de monitoreo de la antena de la estación terrena de la ciudad de Neiva del Macroproyecto Cubesat. Autores: Juan Gilberto García López, John Wilder Montealegre Vanegas.

Diseño del sistema de comunicaciones de la estación terrena sede Neiva CUBESAT UD Autores: Diego García Ramos y Hamilton Rivera Pérez

Diseño de un sistema de antenas para transmisión y recepción de datos en una estación terrena CUBESAT UD – USCO. Autores: Alex Andrey Lavao Pastrana, Miguel Antonio Plazas Muñoz.

Diseño del sistema de control físico para el posicionamiento de la antena de la estación terrena del proyecto Cubesat en la Universidad Surcolombiana. Autores: Diego Mauricio Andrade Vidarte, Leonardo Ernesto Núñez Romero.

Design, development and operation of a student ground station. Autor: A.B.A.T Wickramanayake. Universidad de Lulea.

Layout of a Communication Subsystem for the Pico-Satellite MOVE. Autor: Alexander Friedl pagina 35. Universidad Tecnica de München.

The CubeSat Ground Station at the University of Arizona. Autores: Charles Cooper, Ronald Fevig, Jason Patel. Universidad de Arizona.

## **MANUALES**

Manual de instrucciones Yaesu FT-7800.

Manual de instrucciones Yaesu VX-3R.

Manual de instrucciones Yaesu FT-6R.

Manual de instrucciones Yaesu GS-232A.

Manual de instrucciones TM-D700.

Manual de instrucciones TM-D700. Comunicaciones Especializadas

Operator's Manual Motorola Communications System Analyzer R2600 Series.

Operation Instructions Diamond Precision SWR – Power Meter SX-400.

### **PRINCIPALES ENLACES**

<http://www.amsat.org/amsat-new/satellites/cubesats.php>

[http://apogeeindustriesltd.com/general\\_dynamics.aspx](http://apogeeindustriesltd.com/general_dynamics.aspx)

<http://www.kenwood.es/especificaciones7.htm>

<http://jgav.com/ham/tmd700a.htm>

<http://www.amsat.org/amsat-new/tools/predict/index.php>

<http://www.satsignal.eu/software/wxtrack.htm>

<http://www.fourmilab.ch/earthview/satellite.html>

<http://www.lanasa.net/>

<http://www.sat-net.com/winorbit/>

<http://www.sunsun.net/kd4app/amsat/sounds.htm>

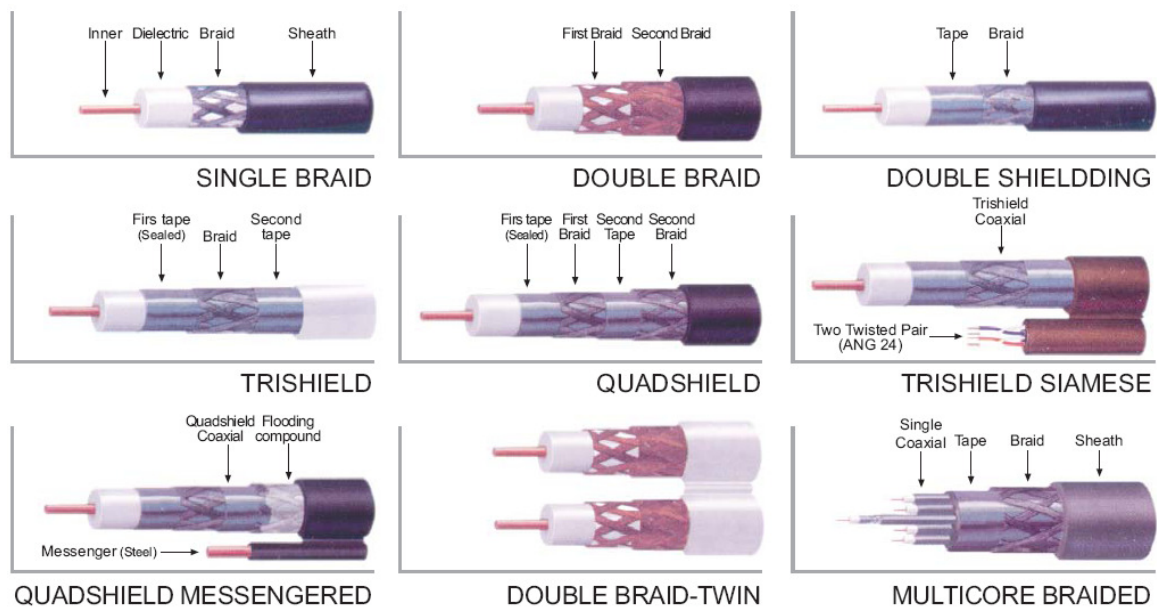
<http://science.nasa.gov/Realtime/Jtrack/spacecraft.html>

## ANEXO A. CABLE COAXIAL

Es un cable eléctrico formado por dos conductores concéntricos, uno central o núcleo, formado por un hilo sólido o trenzado de cobre (llamado positivo o vivo), y uno exterior en forma de tubo o vaina, y formado por una malla trenzada de cobre o aluminio o bien por un tubo, en caso de cables semirrígidos. Este último produce un efecto de blindaje y además sirve como retorno de las corrientes. El primero está separado del segundo por una capa aislante llamada dieléctrico. De la calidad del dieléctrico dependerá principalmente la calidad del cable. Y todo el conjunto puede estar protegido por una cubierta aislante.

### Construcción de los cables:

La elección del diseño afecta al tamaño, flexibilidad y el cable pierde propiedades. Un cable coaxial consta de un núcleo de hilo de cobre rodeado por un aislante, un apantallamiento de metal trenzado y una cubierta externa. El apantallamiento tiene que ver con el trenzado o malla de metal (u otro material) que rodea los cables.



### Estándares:

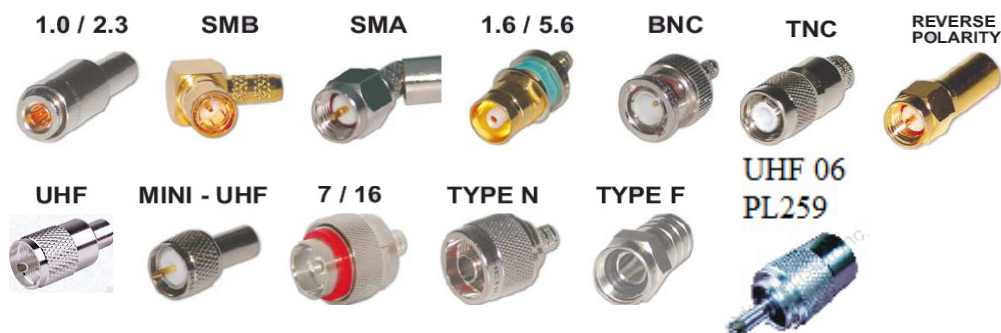
La mayoría de los cables coaxiales tienen una impedancia característica de 50, 52, 75, o 93  $\Omega$ . La industria de RF usa nombres de tipo estándar para cables coaxiales. Aquí se muestran las características:

Tipo	Impedancia [ $\Omega$ ]	Núcleo	dieléctrico			Diámetro		Trenzado	Velocidad
			tipo	[in]	[mm]	[in]	[mm]		
RG-6/U	75	1.0 mm	Solid PE	0.185	4.7	0.332	8.4	double	0.75
RG-6/UQ	75		Sólido PE			0.298	7.62		
RG-8/U	50	2.17 mm	Sólido PE	0.285	7.2	0.405	10.3		
RG-9/U	51		Sólido PE			0.420	10.7		
RG-11/U	75	1.63 mm	Sólido PE	0.285	7.2	0.412	10.5		0.66
RG-58/U	50	0.9 mm	Sólido PE	0.116	2.9	0.195	5.0	single	0.66
RG-59/U	75	0.81 mm	Sólido PE	0.146	3.7	0.242	6.1	single	0.66
RG-62/U	92		Sólido PE			0.242	6.1	single	0.84
RG-62A	93		ASP			0.242	6.1	single	
RG-174/U	50	0.48 mm	Sólido PE	0.100	2.5	0.100	2.55	single	
RG-178/U	50	7x0.1 mm Ag pltd Cu clad Steel	PTFE	0.033	0.84	0.071	1.8	single	0.69
RG-179/U	75	7x0.1 mm Ag pltd Cu	PTFE	0.063	1.6	0.098	2.5	single	0.67
RG-213/U	50	7x0.0296 en Cu	Sólido PE	0.285	7.2	0.405	10.3	single	0.66
RG-214/U	50	7x0.0296 en	PTFE	0.285	7.2	0.425	10.8	double	0.66
RG-218	50	0.195 en Cu	Sólido PE	0.660 (0.680?)	16.76 (17.27?)	0.870	22	single	0.66
RG-223	50	2.74mm	PE Foam	.285	7.24	.405	10.29	Double	
RG-316/U	50	7x0.0067 in	PTFE	0.060	1.5	0.102	2.6	single	

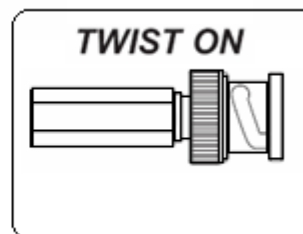
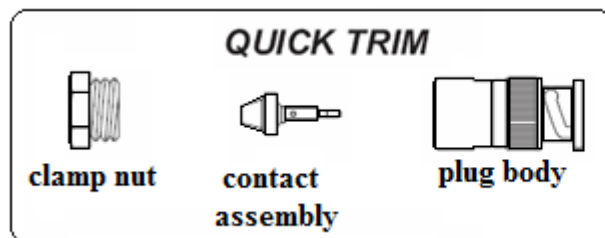
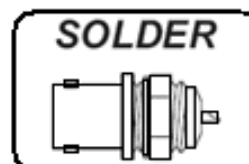
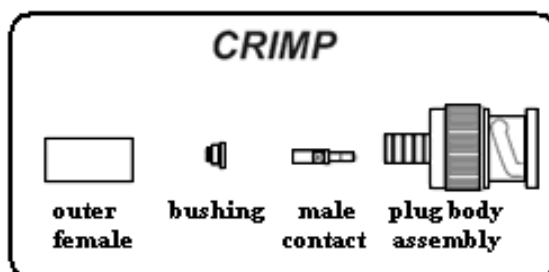
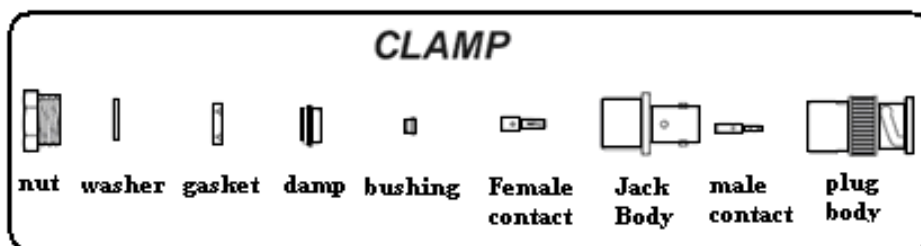
PE es Polietileno; PTFE es Politetrafluoroetileno; ASP es Espacio de Aire de Polietileno

### Tipos de conectores:

A continuación se muestran las características de los conectores para cable coaxial de 50 ohms más utilizados.



Modos de fijación: De acuerdo al tipo de conector y a la aplicación que se requiere existen cinco de técnicas para fijar el conector al cable coaxial.

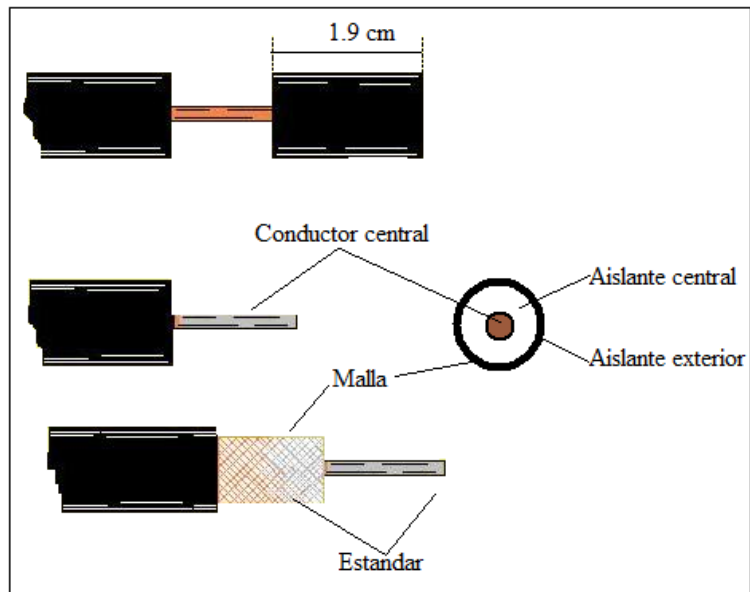


**Forma correcta de montar un conector coaxial PL 259:**

Se "pela" uno de los extremos del cable coaxial unos 2 cm aproximadamente cortando el aislante exterior, la malla y el aislante central, procurando dejar intacto el conductor central (vivo).

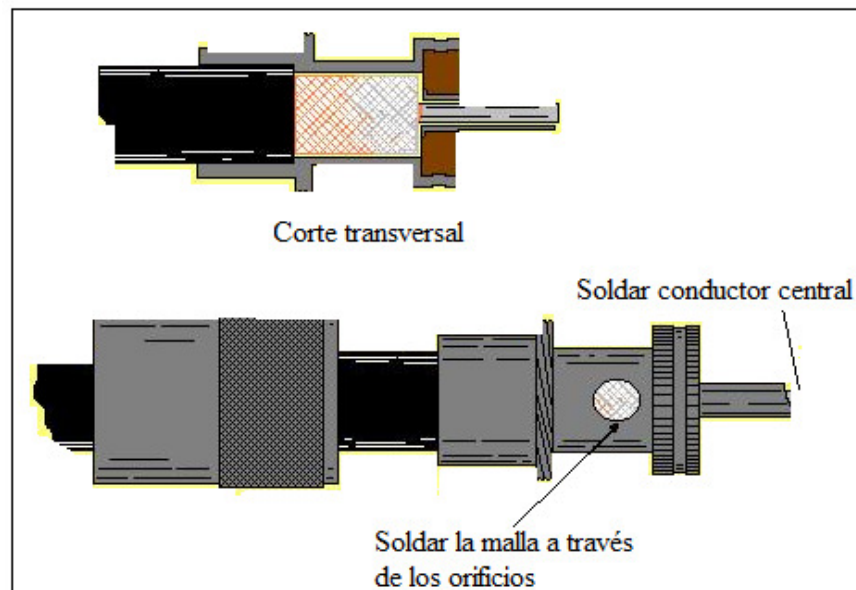
A continuación se "pela" otros 2 cm cortando solamente el aislante exterior, procurando no dañar la malla ni el aislante central.

El siguiente paso consiste en estañar el conductor central y la malla; esta operación es importante realizarla con limpieza, ya que si aplicamos demasiado estaño puede resultar difícil introducir el extremo del cable en el interior del conector PL



Se introduce el cable a través del acoplador externo, es importante no olvidar esto, ya que si no lo hacemos y nos acordamos cuando el PL está ya soldado nos veremos en la situación de deshacer todo el trabajo realizado.

A continuación se introduce el extremo del cable en el interior del conector PL sin forzarlo en exceso y procurando que no se deshaga la malla.



## **ANEXO B. REQUISITOS PARA LA LICENCIA DE RADIOAFICIONADO**

Para obtener la licencia de radioaficionado y con ésta poder desarrollar la radio experimentación con fines de investigación en las bandas de 144 y 438 MHz son:

- A. Formato diligenciado suministrado por el Ministerio de Comunicaciones o Solicitud escrita dirigida a la Dirección Administración Recursos de Comunicaciones donde especifique nombre, apellidos, documento de identidad, edad, profesión, actividad laboral, nacionalidad, dirección residencia, teléfono, ciudad y departamento.
- B. Fotocopia del documento de identidad.
- C. (1) fotocopia 4\*5 fondo azul mate.
- D. Presentar examen y aprobarlo con mínimo 65%.
- E. Comprobante de consignación a favor del Fondo de Comunicaciones Nit. 800.131.648-6 por valor equivalente a veinte (20) salarios mínimos legales diarios (\$ 307.750.00). La consignación se realiza en BANCAFE, cuenta corriente o empresarial No. 018-99272-7, y escribir bien claros nombres y número de cédula.
- F. Una mayor información la puede consultar en la pagina web:  
<http://www.mincomunicaciones.gov.co>

## **ANEXO C. RADIOS SOFTWARE**

### **SDR Software Defined Radio**

Son equipos de radio desarrollados por software o “radios software” en siglas SDR Software Defined Radio, en los que la parte hardware es mínima, y la mayor parte de las funciones que definen un equipo de radio se establecen por software (programas) en un ordenador PC, dotado de tarjeta de sonido.

La SDR supone realizar la mayor parte de las funciones de un equipo de radio, incluso las más importantes, mediante el software implementado en un ordenador. Una radio software (SDR) en cambio, tiene casi todos sus componentes definidos y funcionando en forma de programas en un ordenador, a excepción de un mínimo de componentes físicos externos necesarios, que no pueden ser definidos por software. El software implementado en el ordenador es el que define el esquema de modulación a emplear (AM, FM, BLU....).

### **PSK31**

PSK31 o modulación por desplazamiento de fase a 31 baudios, es un modo digital de radio usado principalmente en el campo de radiocomunicación aficionada y que ésta orientado a establecer conversaciones "Chat" en tiempo real entre operadores de radio.

Para poder operar este modo se usa la Banda lateral del radio conectado a la tarjeta de sonido de la Computadora, cuando un Radioaficionado empieza a teclear, el Software produce Tonos de Audio a través de la tarjeta de sonido, estos sonidos que se producen, para el oído humano se escuchan como silbidos continuos, estos sonidos son lo que transmite el radio y que posteriormente son recibidos y decodificados. Para recibir PSK31, el audio que se recibe del radio debe estar conectado a la entrada de audio de la computadora (line in) y el software decodifica en tiempo real el texto enviado. Resistencia a la interferencia PSK31 es un modo que por sus características es resistente a la interferencia y al desvanecimiento de la señal y llega donde la voz y otros métodos de comunicación fallan. PSK31 fué desarrollado para el uso de los radioaficionados y maneja una velocidad relativamente baja, como no se cuenta con control de errores no es apto para el envío de un bloque demasiado grande de texto.



## ANEXO D. FOTOS

### ESTACIÓN TERRENA USCO





## ESTACIÓN TERRENA USCO





MEDICIÓN DEL PATRON DE RADIACIÓN





MEDICIÓN DEL PATRON DE RADIACIÓN



# IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES DE LA ESTACIÓN TERRENA USCO

DIEGO LOZANO CLAROS  
OSCAR FERNANDO VELASQUEZ CHALA

## RESUMEN

El proyecto se divide en cinco partes fundamentales: el cálculo del radioenlace, la descripción del hardware y software utilizado, la evaluación de las características de transmisión de los equipos de comunicación, estudio de interferencia y las pruebas de comunicación con satélites radioaficionados y/o Cubesat.

El cálculo del radioenlace se hizo con el fin de tener una base teórica firme para la implementación de la Estación Terrena. Aunque existe un estudio previo (Diseño del sistema de comunicaciones de la estación terrena sede Neiva CUBESAT UD), éste presenta inconsistencias en el cálculo de pérdidas de la señal.

En este proyecto se describen las características de cada uno de los instrumentos, herramientas y dispositivos que conforman la Estación Terrena USCO. Adicionalmente, se describen las ventajas, desventajas y funcionamiento de cada uno de estos. El estudio incluye el diseño de un programa para automatizar el seguimiento del satélite y el sistema de comunicación de la estación terrena, el cual controla la orientación de las antenas de la estación para lograr una correcta alineación con el satélite, además permite utilizar las funciones básicas del radio.

Se hizo un estudio de interferencia para reconocer señales que pueden impedir la recepción completa, o causar pérdida

temporal de la señal en las bandas de frecuencia de la estación.

Por último se integró el sistema y se apuntaron las antenas hacia el espacio exterior, se siguió la trayectoria de ocho satélites dando como resultado la recepción de señal **beacon** de cada uno de ellos.

## ABSTRACT

This study is presented into five main sections: the Link Budget calculation, a thorough description of the software and hardware used, an evaluation of the transmission features of the communication devices employed, an analysis of interference, and the try-out runs with amateur radio satellites and/or Cubesat.

The calculation of the Link Budget gives the study a solid theoretical background that informs the implementation of the Ground station. Although a previous study exist (Communication system design for the Usco's Ground Station), it presents some inconsistencies in the signal loss that are further addressed in the current study.

The features of each of the instruments, tools, and devices that make up the USCO Ground station are described in this study. Advantages, disadvantages, and recommendations for each the components are also listed. Also included in this study is the design of a program to automate the satellite tracking and the Ground station's

communication system. This program controls the antennas of the station to achieve proper alignment with the satellite and allows for the use of the basic radio features.

An analysis of interference was also carried out in order to identify signals that may impede the full reception or cause a temporary loss of the signal in the frequency bandwidth of the station.

Finally, the system was integrated and the antennas were directed to the outer space where the trajectories of eight satellites were tracked by receiving the **beacon** signal of each one of them.

## INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de las personas para comunicarse desde los grandes centros urbanos hasta lugares remotos ha impulsado un desarrollo académico y tecnológico continuo en diferentes ramas de las telecomunicaciones, una de éstas son las comunicaciones por satélite, campo en el que la Universidad Surcolombiana con apoyo de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas está dando sus primeros pasos con el macroproyecto CUBESAT- UD – USCO telemedicina y telemetría. El aporte más significativo que la Universidad Surcolombiana hace al proyecto CUBESAT es la implementación de la Estación terrena ubicada en la ciudad de Neiva.

Dentro de los desarrollos que hasta el momento se han logrado en la Universidad Surcolombiana, se encuentran:

- El Diseño del Sistema de Comunicaciones: Se fundamenta principalmente en el estudio de la caracterización del canal de comunicaciones.
- Diseño del Sistema de Control: Consta de dos proyectos:

- Control Físico para el Posicionamiento de la Antena: Es el dispositivo (ICU G-5500) que hace la interface entre PC y el actuador (Rotor G-5500).
- Control del Desplazamiento y Software de Monitoreo de la Antena.

- Diseño de un Sistema de Antenas para la Transmisión y Recepción de Datos: Es el estudio y simulación de los modelos de antenas que cumplen teóricamente los requisitos en comunicaciones del proyecto,

Este proyecto tiene como finalidad establecer la comunicación entre satélites pertenecientes a la red Cubesat y/o radioaficionados y la Estación Terrena USCO. Durante el proceso de desarrollo fue necesario profundizar en el tema de las comunicaciones satelitales, evaluar el desempeño de los componentes y estudios realizados con anterioridad, y finalmente implementar la Estación Terrena.

## 1. CALCULO DEL RADIOENLACE

El cálculo del radioenlace es fundamental para diseñar cualquier tipo de comunicación inalámbrica. Para esto se deben tener en cuenta todas las pérdidas y ganancias de potencia que existen entre el transmisor y el receptor, en condiciones críticas; con el fin de establecer un límite o margen para que un radioenlace funcione correctamente.

El punto de partida para el análisis es la ecuación de FRIIS, que relaciona la potencia transmitida por una antena y recibida por otra antena:

$$P_r = \frac{G_t \cdot P_t}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot A_r$$

Donde:  $G_t$  : Ganancia de la antena  
 $P_t$  : Potencia de transmisión  
 $d$  : Distancia entre las dos antenas.  
 $A_r$  : Área efectiva

$$A_r = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} \cdot G_r$$

Remplazando:  $P_r = \left( \frac{c}{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f} \right)^2 \cdot P_t \cdot G_t \cdot G_r$

En decibeles:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - 32.45 - 20 \cdot \log\left(\frac{d}{1 \cdot \text{km}}\right) - 20 \cdot \log\left(\frac{f}{1 \cdot \text{MHz}}\right)$$

En donde  $L_p = 32.45 + 20 \cdot \log\left(\frac{d}{1 \cdot \text{km}}\right) + 20 \cdot \log\left(\frac{f}{1 \cdot \text{MHz}}\right)$

es llamado pérdidas por espacio libre.

El enlace entre el satélite y la Estación es más complejo y se considerarán otros tipos de pérdidas como: pérdidas por polarización ( $L_{pol}$ ), por lluvia ( $L_{llu}$ ), por apuntamiento ( $L_{apun}$ ), atmosféricas ( $L_{atmos}$ ), por línea de transmisión ( $L_{linea}$ ), y por inserción de filtro LNA ( $L_{filtroLNA}$ )

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_p - L_{pol} - L_{llu} - L_{apun} - L_{atmos} - L_{linea} - L_{filtroLNA}$$

Ec. 1.5

A continuación se muestra una tabla, en donde se resume cada una de estas pérdidas y los parámetros más importantes del enlace

Concepto	Símbolo	Valor
Ancho de Banda	BW	10KHz
Potencia Satélite	$P_{t_{satélite}}$	100mW = -10dBW
Potencia Estación	$P_{t_{estación}}$	5W = 7dBW
<b>Pérdidas:</b>		
Pérdida polarización	$L_{pol}$	3dB
Pérdida línea satélite subida	$L_{linea\_Subida\_Satélite}$	0.005dB
Pérdida línea Estación	$L_{linea\_Subida\_Estación}$	2.025dB

subida		
Pérdida línea satélite bajada	$L_{linea\_Bajada\_Satélite}$	0.009dB
Pérdida línea Estación bajada	$L_{linea\_Bajada\_Estación}$	3.513dB
Perdida Esp. libre Subida	$L_{pSubida}$	146.08dB
Perdida Esp. libre Bajada	$L_{pBajada}$	155.63dB
Perdida Lluvia	$L_{llu}$	0dB
Perdida Apuntamiento	$L_{apun}$	1dB
Perdida Atmosférica	$L_{atmos}$	2.1dB
<b>Ganancias:</b>		
Ganancia Antena Satélite	$G_{ant\_Satélite}$	1dBi
Ganancia Antena Estación	$G_{ant\_Estación}$	15dBi
Ganancia LNA	LNA	15dB
<b>Temperatura:</b>		
Temperatura Estación	$T_{s\_Estación}$	2168.36°K
Temperatura Satélite	$T_{s\_Satélite}$	678°K

## 2. ESTADO DE LA ESTACION

En este capítulo se describen las características, funcionamiento, recomendaciones, ventajas y desventajas de cada uno de los instrumentos, herramientas y dispositivos que conforman la Estación Terrena USCO. A continuación se listan las características y especificaciones generales de la Estación, y los dispositivos y software que la componen:

## Especificaciones de la Estación USCO

<b>Nombre de la Estación Terrena</b>	<b>USCO</b>
Universidad	Surcolombiana
Ciudad	Neiva
País	Colombia
Altitud	2.9437 N
Longitud	75.3006 W
Frecuencias de Operación	144-146 MHz, 432-438 MHz
Antenas (2m – VHF)	Yagi diseñadas y comerciales (Cushcraft 13B2)
Antenas (70cm – UHF)	Yagi diseñadas y comerciales (Cushcraft A44911S)
Rotor de la antena	Yaesu G-5500
Control Rotor	Yaesu G-5500
Interface PC-Control rotor	Yaesu GS-232B, ICU G-5500 (Desarrollo USCO)
Radios	Kenwood TM-D700, Yaesu FT-7800
Radios auxiliares	Yaesu VX-6R, Yaesu VX-3R
Vatímetro & SWR	Diamond SX-400
GPS	Garmin Etrex
UPS	APC 1 KVA
Fuente de corriente	Diamond GZV4000
Analizador de espectro	Motorola serie R2600
Cable coaxial	LMR-400
Cable de control	Multipar de 10 hilos.

Amplificador de bajo ruido LNA (70cm)	SP-700 (Recomendado)
Conmutador coaxial	SSB AS-304 DC - 600MHz (Recomendado)
PC1 , PC2 y PC3	Procesador Intel® Core™ 2 duo, 2.19 GHz , Memoria DDR2 1GB
Sistema Operativo	Windows XP
Software de predicción de efemérides	WinOrbit WxTrack Orbitron Jtrack AMSAT
Software tiempo real	WinOrbit WxTrack Orbitron ICU G5500 2.0 PROET (Aplicación en Labview)
Software post-pasada	PROET (Aplicación en Labview)
Software TNC	PROET (Aplicación en Labview)

**Antenas:** se consideran como uno de los dispositivos más importantes para establecer la comunicación satelital, ya que sus características eléctricas determinan la recepción exitosa y transmisión de señales de radio. Por este motivo se han simulado, fabricado y probado diversas antenas, entre las que se encuentran las antenas comerciales adquiridas, las diseñadas en los estudios previos y las antenas diseñadas en el desarrollo de este proyecto.

ANTENA	CARACTERISTICAS
COMERCIAL (A44911S)	Polarización: Lineal Banda 440-450 MHz Ganancia: 15.6dBi Relación Adelante-atrás: 20dB Ancho de haz $-3dB$ : 48°



COMERCIAL (13B2)	Polarización: cruzada Banda 144 – 148 MHz Ganancia: 18.2dBi Relación Adelante-atrás: 26dB Ancho de haz $-_{3dB}$ : 36°
DISEÑADA (2m) Dipolo	Polarización: Lineal Banda 144 – 148 MHz Ganancia: 2,4 dBi
DISEÑADA (70cm) Yagi con elementos incrustados en el boom	Polarización: Lineal Banda 440 – 450 MHz Ganancia: 12 dBi Relación Adelante-atrás: 19dB Ancho de haz $-_{3dB}$ : 30°
DISEÑADA (70cm) Yagi con elementos sobre el boom	Polarización: Lineal Banda 440 – 450 MHz Ganancia: 11.5 dBi Relación Adelante-atrás: 121dB Ancho de haz $-_{3dB}$ : 35°

**Kenwood TM – D700:** este transceptor trabaja en las bandas de radioaficionados 144MHz (VHF) y 438MHz (UHF). Tiene tres niveles de potencia: bajo(5W), medio(10W) y alto(50W para la banda de VHF y 40W para la banda de UHF).

Radio Kenwood TM – D700



Además tiene las siguientes funciones:

- CDCSS (Sistema de Silenciamiento Codificado de Tonos Continuos)
- DCS (Silenciamiento Codificado Digital)
- TNC (Nodo Terminal Controlado)
- ARPS (Sistema de Notificación de Posición/ Paquetes Automática)

- SSTV(Sistema Exploración Lenta de Televisión)
- Sky Command (Para controlar un transceptor **KENWOOD** HF en un lugar remoto)

El mínimo paso en frecuencia es de 5KHz, una desventaja para seleccionar las frecuencias de corrimiento Doppler entregadas por el software de predicción que son del orden de centenas de Hz, imposibilitando la compensación continúa de frecuencia para corregir el corrimiento por efecto Doppler. En muchas Estaciones Terrenas para Cubesat disponen de radios como el ICOM 910 y Yaesu FT-870 que tienen un mínimo paso de 10Hz, ideal para corregir el efecto Doppler.

El radio Kenwood D700 permite la recepción de frecuencias desviadas por Doppler hasta +/- 6KHz, ya que tiene una selectividad de 12KHz a -6 dB y 28KHz a -40 dB con un factor de forma igual a 2.5, pero esto no indica que se haya hecho compensación por Doppler, porque la señal recibida no es correctamente sintonizada, lo que produce pérdidas en potencia.

Tiene un **TNC** incorporado que maneja el protocolo AX.25, útil par enviar y recibir paquetes de datos y para tratar formatos de datos soportados por el Sistema de Notificación de Posición/ Paquetes Automática (APRS®). Es capaz de recibir paquetes en una banda al mismo tiempo que recibe audio en otra. Se conecta al PC por medio de un conector RS-232 permitiendo enviar comandos de control para la configuración del radio y del TNC.

**Rotor GS-5500 y control GS-5500:** el Rotor GS-5500 se mueve en un rango de 0° a 450° de Azimut y de 0° a 180° de elevación, tiene dos unidades de rotación independiente (Azimut y elevación) y gracias a su construcción es libre de mantenimiento bajo todas las condiciones climáticas.

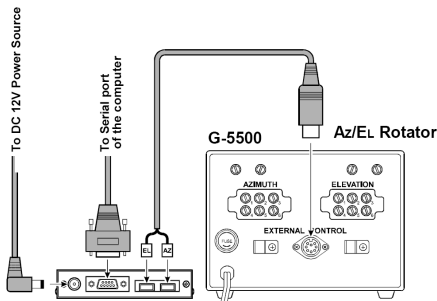
Rotor GS-5500 y control GS-5500



Fuente:

[http://www.locuradigital.com/rotores\\_antenas/g5500.htm](http://www.locuradigital.com/rotores_antenas/g5500.htm)

La unidad de control GS-5500 tiene 4 interruptores para establecer los ángulos de azimut y elevación manualmente, posee un terminal DIN para ser controlado remotamente; tiene dos sockets de salida, uno para elevación y otro para azimut, cada socket con 6 pines enumerados, conectados al rotor a través de un cable que lleva las señales de control



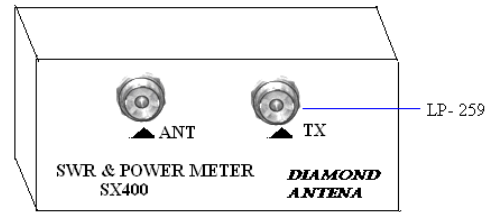
**Vatímetro & SWR Diamond SX-400:** este dispositivo mide la potencia RF (140MHz - 525MHz) directa y reflejada de una señal hasta 200W. Además sirve para medir la relación de onda estacionaria SWR, medida utilizada para determinar el grado de acoplamiento de impedancia entre el radio y la antena. Tiene tres selectores, uno para la potencia (se debe seleccionar la escala apropiada), otro para seleccionar la función (potencia, calibración o SWR) y el otro para escoger que potencia se quiere medir (directa o reflejada).

## Vatímetro & SWR Diamond SX-400



En la parte trasera tiene dos conectores PL-259, uno que conecta a la antena y otro al radio como se observa en la Figura.

Parte trasera del Vatímetro & SWR Diamond SX-400



Antes de medir el SWR es necesario calibrar el dispositivo; para esto debe seleccionar la función CAL, transmitir con el radio y por medio de la perilla CAL ubicar la aguja del indicador análogo sobre la última línea del extremo derecho, luego se escoge la función SWR. Mediciones de SWR mayores de 1,5 indican que hay un desacople significativo de impedancia en el sistema y es peligroso dañar la entrada/salida del radio, pues, la potencia transmitida directa se suma con la potencia reflejada excediendo el nivel de potencia máximo del radio.

### 3. PROGRAMA DE LA ESTACIÓN TERRENA

Este capítulo describe el funcionamiento del programa diseñado para automatizar el seguimiento del satélite y el sistema de comunicación de la estación terrena.

El programa controla la orientación de las antenas de la estación para lograr una correcta alineación con el satélite, además permite utilizar las funciones básicas del radio, especialmente el cambio de frecuencias que se ajusta a las características de transmisión y

habilitar el módulo para enviar y recibir datos. También realiza el cálculo en tiempo real de los parámetros del enlace y decodifica la señal de audio CW recibida.

La orientación de las antenas depende de la posición del rotor, el cual es controlado mediante el programa, de acuerdo a las coordenadas de azimut y elevación que permiten tener línea de vista con el satélite. Los datos de azimut y elevación son importados al programa desde el software de predicción mediante el protocolo de intercambio dinámico de datos (DDE).

Igualmente, el programa controla las funciones de radio como el nivel de **squelch** y volumen, potencia, banda de transmisión, frecuencia, TNC, entre otras. La frecuencia se ajusta automáticamente cuando se hace necesario configurar las frecuencias de transmisión y recepción del satélite que en esos momentos se encuentre en la cobertura de la estación, también cuando se hace el desplazamiento de frecuencias para corregir el efecto Doppler. Además es posible cambiar las frecuencias de forma manual desde el programa con el objetivo de dar autonomía al operador.

El radio tiene incorporado un módulo de transmisión de datos (TNC), apropiado para establecer comunicación con repetidores y sistemas digitales a bordo de satélites de última generación. El TNC es controlado y configurado por el programa teniendo en cuenta el modo de operación (ARPS o paquetes), velocidad de transmisión, tipos de modulación, identificación del equipo entre otras.

Una herramienta útil del programa es el cálculo en tiempo real de los parámetros que definen la calidad de los enlaces de subida y bajada; teniendo en cuenta los factores que definen el canal de comunicaciones como son: la posición relativa del satélite, las propiedades que tiene el medio para propagar las señales de radio y las características propias de los dispositivos del sistema de comunicaciones.

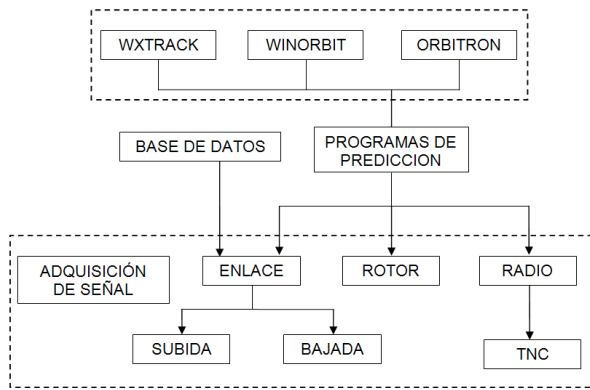
Además de las anteriores funciones, el programa adquiere, procesa y decodifica la información contenida en la señal Beacon, la cual es un tono en la banda de frecuencias audible codificada en Morse mediante modulación CW. Comúnmente la información muestra las características propias del satélite como su nombre y datos de telemetría donde se especifica el estado actual de sus componentes.

Aparte de las funcionalidades del programa ya descritas se ha tenido en cuenta que el diseño de la interface de usuario sea amigable. Por tal motivo se recurrió a la utilización de graficas, dibujos, colores y pestañas que ayudan al fácil reconocimiento de las partes del programa e interpretación de los datos. Pero, para lograr un balance entre funcionabilidad y una buena presentación existe una fuerte dependencia en el software de programación que se utilice, por lo tanto fue de vital importancia encontrar y decidir que software se ajustaba a nuestras necesidades. LabVIEW fué el más indicado gracias a sus potentes herramientas de programación enfocadas al control y al análisis y procesamiento de señales, además que permite crear instrumentos virtuales, fondos e imágenes que hacen que la interface con el usuario sea agradable.

El programa diseñado se nombró PROET (Programa de la Estación Terrena), a continuación se muestra un diagrama en bloques el funcionamiento completo de PROET y de los programas necesarios para su funcionamiento.  
como:

PROET\_RADIO, controla el radio.  
PROET\_ROTOR, controla el rotor.  
PROET\_ENLACE, calcula el enlace.  
PROET\_ADQUISICIÓN, adquiere la señal de audio.  
PROET\_TNC, controla el TNC

Diagrama en bloques del funcionamiento del programa



Las aplicaciones de PROET, se designaron. Para un funcionamiento correcto, PROET depende de los programas de predicción, ya que le suministran datos a PROET\_RADIO (para corrección de la frecuencia), a PROET\_ROTATOR (para ubicarlo en el azimut y elevación) y a PROET\_ENLACE (para hacer los cálculos en tiempo real); la base de datos solo es necesaria para PROET\_ENLACE (proporciona información de los satélites de órbita baja operacionales); la aplicación PROET\_ADQUISICIÓN no requiere ningún tipo de programa adicional para su funcionamiento, ya que solo se encarga de grabar (a través de la tarjeta de audio) y reproducir las señales de audio recibidas por el radio; PROET\_TNC es una aplicación que se activa desde el radio y tampoco requiere ningún programa adicional.

#### 4. MONTAJE Y PRUEBAS

Las prácticas de laboratorio constituyen la esencia del conocimiento científico y tecnológico, porque nos permiten analizar e inferir sobre el comportamiento real del objeto de estudio.

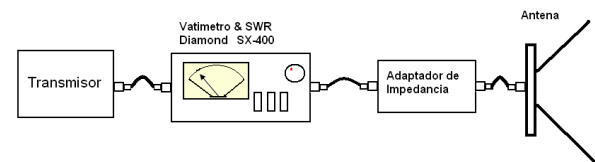
Este capítulo describe el procedimiento para caracterizar y evaluar los equipos de comunicación y control de la estación terrena, teniendo como referencia los cálculos y simulaciones realizadas previamente, es así, que los resultados de estas pruebas definirán el éxito del proyecto.

Una de las pruebas fundamentales es la medición de las características eléctricas de las antenas, ya que permiten verificar si cumplen con los requerimientos (ganancia, directividad y polarización) para establecer la comunicación con satélites de órbita baja. Otra prueba decisiva es reconocer señales que puedan causar interferencia en las bandas de frecuencia que la estación utiliza para establecer comunicación, ya que cualquier otra señal que se encuentre cerca puede impedir la recepción completa, o causar pérdida temporal de la señal.

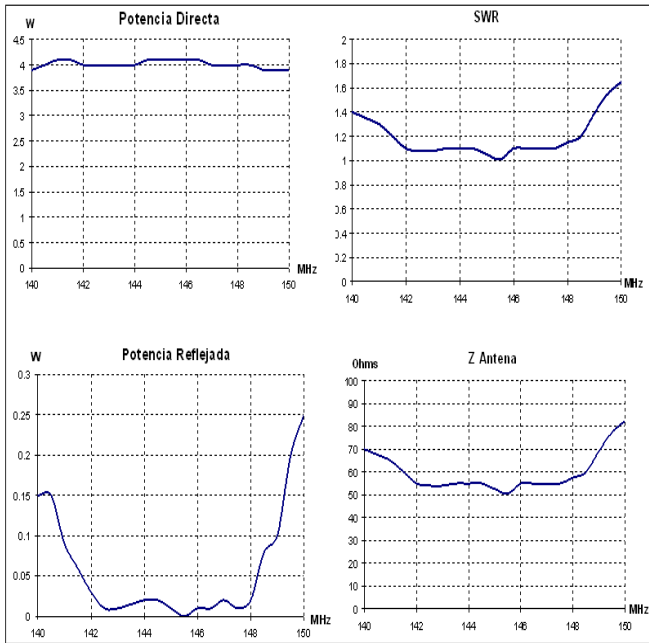
La evaluación de los resultados de las pruebas permite elegir la instalación adecuada de los equipos para garantizar la comunicación con los satélites de la red CUBESAT y de radioaficionados que tienen características similares al que se pretende poner en órbita por parte de la Universidad Distrital.

Es importante tener en cuenta que en la anterior ecuación no se consideran las pérdidas por línea de transmisión, por lo que su valor es aceptable para distancias muy cortas de cable, por eso la línea de transmisión para esta prueba tiene una distancia aproximada de 1m. El esquema de conexión para medir SWR se muestra en la siguiente figura:

Esquema de conexión para medir SWR

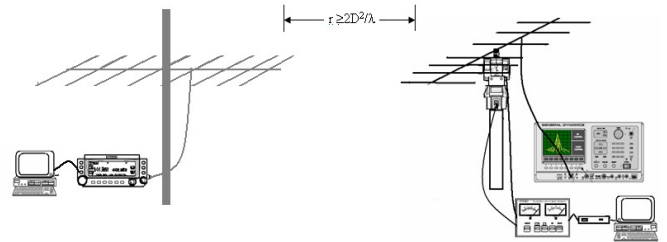


Grafica de los resultados obtenidos a partir de la medición del SWR para la antena Cushcraft 13B2

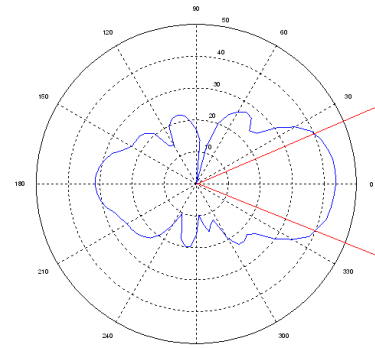


conocer de una forma clara y sencilla como radia una antena, permite deducir su directividad, ganancia, relación adelante-atrás y el ancho del haz.

Esquema de medición del patrón de radiación

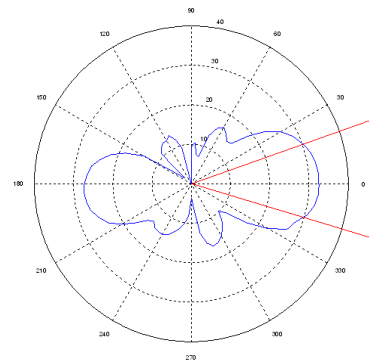


Patrón de radiación real de la antena elementos sobre el boom.



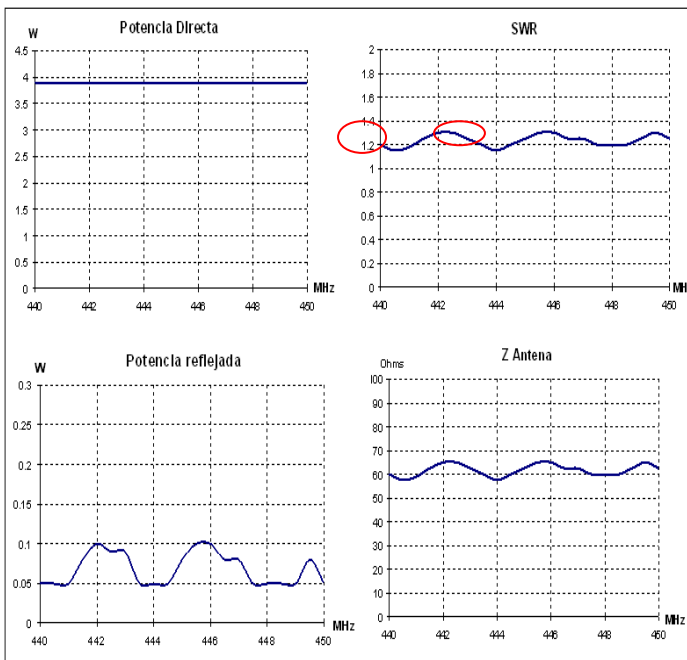
Ancho de haz = 50°  
Relación adelante-atrás = 12dB

Patrón de radiación real para antena de elementos incrustados en el boom.



Ancho de haz = 44°  
Relación adelante-atrás = 8dB

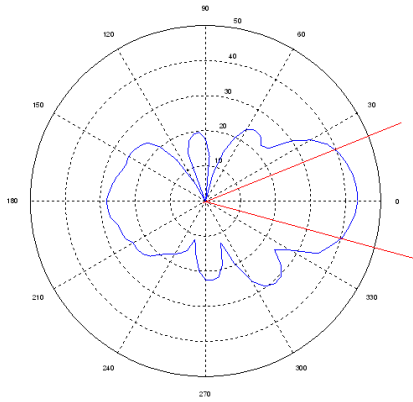
Gráfica de resultados obtenidos a partir de la medición del SWR para la antena Cushcraft A44911S



## MEDICIÓN DEL PATRÓN DE RADIACIÓN

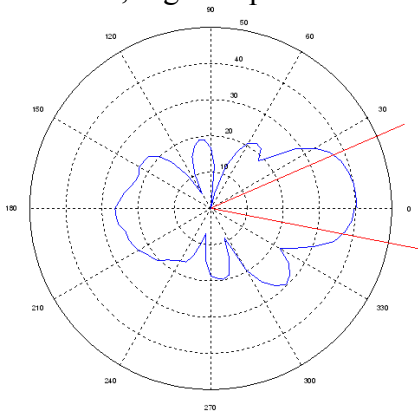
El diagrama de radiación de una antena es una herramienta muy útil para el análisis de las características de una antena. Con él se puede

Patrón de radiación real de la antena Cushcraft A44911S, primera prueba.



Ancho del haz=36°  
Relación adelante atrás=16dB

Patrón de radiación real de la antena Cushcraft A44911S, segunda prueba.



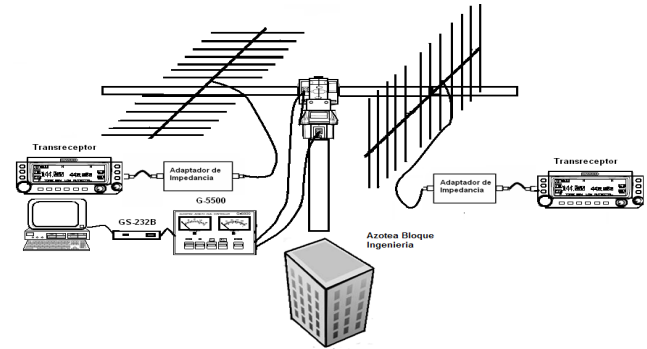
Ancho del haz=35°  
Relación adelante atrás=14dB

## MEDICIÓN DE INTERFERENCIA

La prueba consiste en barrer el espectro en frecuencia para las bandas de 144MHz y 438MHz, de esta forma las señales presentes son registradas y almacenadas en una base de datos. En el registro se especifica la fecha, hora, potencia recibida, frecuencia central y ancho de banda. Esta pruebas de interferencia se han estado tomando periódicamente desde el viernes 14 de marzo de 2008 hasta la fecha.

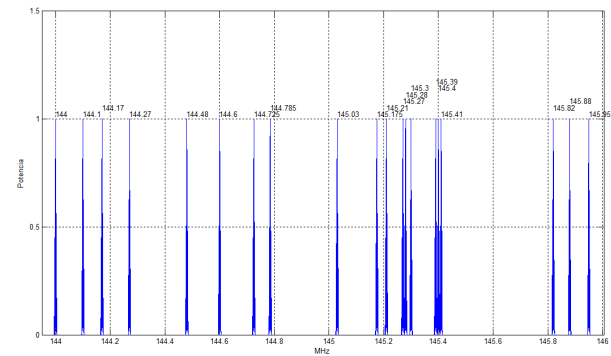
Los equipos para hacer las pruebas han sido instalados en la azotea del cuarto piso, sitio donde están las antenas de la Estación.

Esquema de medición de interferencia utilizando dos radios y el rotor.

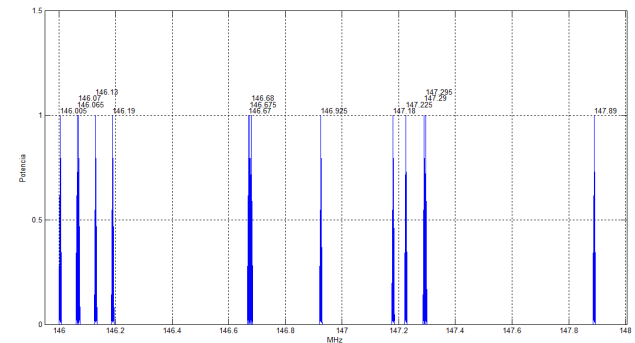


Las figuras que se exponen a continuación muestran las señales registradas durante el estudio de interferencias en el rango de frecuencias que utiliza la Estación.

Frecuencias registradas desde 143.5 hasta 146MHz.



Frecuencias registradas desde 146 hasta 148MHz.



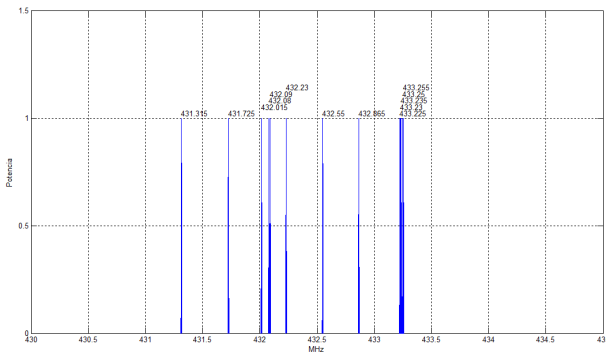
Ya que el objetivo es encontrar todas las señales en esta banda que pueden causar interferencia, y debido a que con el radio no se puede establecer el nivel de potencia que tienen las señales encontradas, se toma como nivel umbral 1, es decir todas la señales que capte el



radio se consideraran como posibles interferencias. Además, hay que considerar el mínimo nivel de squelch que permita hacer el barrido de frecuencias ya que se debe garantizar que todas las señales que interfieren sean registradas para lograr establecer parámetros que limitan la comunicación.

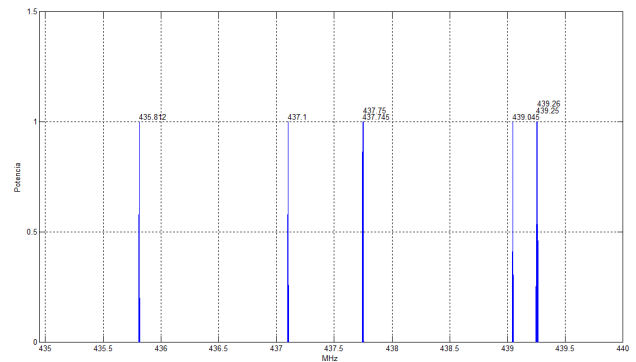
El estudio muestra que el máximo número de señales se encuentran desde 145 a 145.5 MHz y desde 146 a 146.2 MHz. Sin embargo, para esta banda de frecuencia estas interferencias no son tan críticas, debido a que es la banda de transmisión de la estación terrena y se puede solucionar el problema de interferencia aumentando un poco el nivel de la potencia de transmisión hasta el tope límite que tenga reglamentado el Ministerio de Comunicaciones.

Frecuencias registradas desde 430 hasta 435MHz.



Para la banda de UHF, las medidas se realizaron con un squelch de 3 para tratar de encontrar todas las posibles señales que pueden afectar la recepción en la estación terrena. El estudio muestra que el número máximo de señales que pueden causar interferencia en la recepción, se encuentran entre 431 y 433.5 MHz.

Frecuencias registradas desde 435 hasta 440MHz.



#### 4.4 RADIO ENLACE SATELITAL

Después de tener las características electromagnéticas de las antenas y del sistema de comunicaciones, el estudio de interferencia, la experiencia en el manejo de los equipos de comunicación, la ubicación correcta del rotor (0° N), los predictores actualizados y sincronizados, el programa principal terminado (PROET) el cual permite el control automático del radio y rotor, el cálculo en tiempo real del enlace y que decodifica la información contenida en la señal Beacon, el siguiente paso consistió en integrar armónicamente cada uno de estos elementos, aunque se identificaron fallas como el cambio de movimiento brusco generado por el control al rotor, éstas fueron corregidas y afinadas.

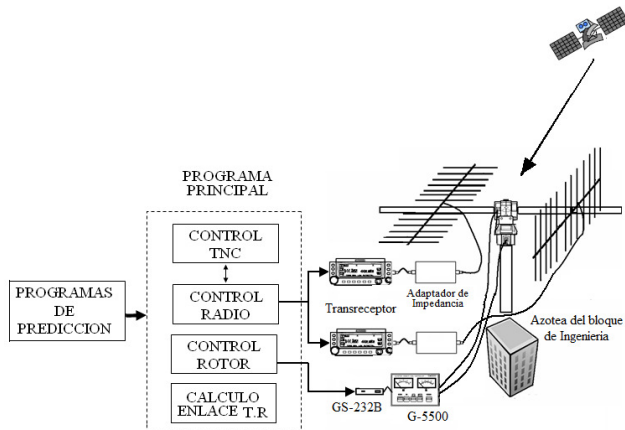
Después de la integración del sistema de la Estación terrena, se decidió identificar los satélites que cumplieran con requisitos y limitaciones en potencia y frecuencia del sistema.

Como primer seleccionado fué el RS-22, el cual es un satélite construido por la academia militar de Mozhaisky en St. Petersburg, Rusia, tiene una órbita LEO de 693 x 675km, transmite una señal Beacon a 435.3520 MHz modulada en CW, transmite datos de telemetría en 16 grupos de cinco a siete caracteres y el código es enviado con pausas de 10 segundos entre cada grupo.

Después de la selección e identificación, se hicieron simulaciones para evaluar el sistema tomando como referencia las trayectorias

futuras que tuvieran cobertura sobre la estación y se encontró que era viable. Con todo el sistema listo se decidió apuntar las antenas hacia el espacio exterior y empezar el rastreo de la trayectoria del RS-22, dando como resultado unas pruebas exitosas, pues se logró recibir la primera señal satelital en la Estación.

Esquema del sistema de la Estación Terrena USCO.



El procedimiento fué repetido con la mayoría de satélites radioaficionados y/o Cubesat. Sin embargo, se logró establecer comunicación con aquellos que transmitían a una potencia superior a 300mW, ya que a menores potencias el sistema actual no las puede detectar debido a sus limitaciones de sensibilidad. Por ello, se recomienda la utilización de etapas de amplificación (LNA), antenas con mayor ganancia (preferiblemente superior a 15dB) y radios con mejor sensibilidad que los actuales (0.16uV).

Cabe aclarar, que además de los requisitos de potencia anteriormente mencionados, las señales recibidas se encontraban en la banda de 430 a 439 MHz, pero algunas de estas eran contaminadas por señales transmitidas en la cercanía de la estación, las cuales se encuentran registradas en el estudio de interferencia.

Los satélites con los que se ha logrado tener pruebas exitosas son: UO-22, AO-07, LO-19, RS-22, CO-57, y el CO-55.

A continuación se muestran algunas características de los satélites con los que se logró establecer comunicación y las condiciones del enlace en el momento de adquisición de señal (AOS) y pérdida de señal (LOS).

Pruebas de comunicación satelital de recepción.

SATÉLITE	DATOS		
UO - 22	Fecha	Junio 5 de 2008	
	Frecuencia	437,535 MHz	
	Potencia de Transmisión	300 mW	
	AOS	Tiempo (UTC)	18:18
		Azimut	136°
		Elevación	6°
		Doppler (Hz)	8217
	LOS	Distancia (Km)	2632
		Tiempo (UTC)	18:28
		Azimut	18°
Elevación		6°	
Doppler (Hz)		-8224	
Distancia (Km)	2603		

AO - 7	Fecha	Junio 5 de 2008	
	Frecuencia	435,100 MHz	
	Potencia de Transmisión	250 mW	
	AOS	Tiempo (UTC)	23:04
		Azimut	88°
		Elevación	14°
		Doppler (Hz)	738
	LOS	Distancia (Km)	3220
		Tiempo (UTC)	23:09
		Azimut	48°
Elevación		13°	
Doppler (Hz)		-1047	
Distancia (Km)	3323		



S - 22	Fecha	Junio 6 de 2008		
	Frecuencia	435,350 MHz		
	Potencia de Transmisión	300 mW		
	AOS	Tiempo (UTC)	15:35	
		Azimut	213°	
		Elevación	5°	
		Doppler (Hz)	0	
		Distancia (Km)	2545	
	LOS	Tiempo (UTC)	15:43	
		Azimut	304°	
		Elevación	5°	
Doppler (Hz)		0		
Distancia (Km)		2543		

CO - 57	Fecha	Junio 6 de 2008		
	Frecuencia	436,847 MHz		
	Potencia de Transmisión	100 mW		
	AOS	Tiempo (UTC)	22:27	
		Azimut	149°	
		Elevación	6°	
		Doppler (Hz)	9112	
		Distancia (Km)	2806	
	LOS	Tiempo (UTC)	22:39	
		Azimut	5°	
		Elevación	6°	
Doppler (Hz)		-9143		
Distancia (Km)		2781		

LO - 19	Fecha	Junio 6 de 2008		
	Frecuencia	437,125 MHz		
	Potencia de Transmisión	750 mW		
	AOS	Tiempo (UTC)	21:54	
		Azimut	175°	
		Elevación	6°	
		Doppler (Hz)	9632	
		Distancia (Km)	2692	
	LOS	Tiempo (UTC)	22:06	
		Azimut	341°	
		Elevación	6°	
Doppler (Hz)		-9613		
Distancia (Km)		2681		

CO - 55	Fecha	Junio 6 de 2008		
	Frecuencia	436,837 MHz		
	Potencia de Transmisión	100 mW		
	AOS	Tiempo (UTC)	22:32	
		Azimut	150°	
		Elevación	6°	
		Doppler (Hz)	9151	
		Distancia (Km)	2797	
	LOS	Tiempo (UTC)	22:44	
		Azimut	4°	
		Elevación	6°	
Doppler (Hz)		-9181		
Distancia (Km)		2771		

Pruebas de comunicación satelital de recepción y transmisión.

AO - 51	Fecha	Agosto 22 de 2008		
	Frec. de Recepción	145,920 MHz		
	Frec. de Transmisión	435,300 MHz		
	Potencia de Transmisión	250 mW		
	AOS	Tiempo (UTC)	00:39	
		Azimut	194°	
		Elevación	2°	
		Doppler (Hz)	8801	
		Distancia (Km)	2925	
	LOS	Tiempo (UTC)	00:51	
		Azimut	323°	
		Elevación	2°	
Doppler (Hz)		-8768		
Distancia (Km)		2994		

**5. CONCLUSIONES**

Se logró establecer radioenlaces (simplex) entre la Estación Terrena USCO con algunos satélites de la red Cubesat y radioaficionados. Éstos consistieron en recibir en Tierra la señal beacon emitida por el satélite.

Se comprobó que la parte más crítica del radioenlace es recibir la señal que transmite el satélite, ya que la potencia en Tierra está alrededor de  $3,75 \times 10^{-18}$  (Atto) vatios y una SRN alrededor 7dB, siendo un nivel tan pequeño que es cercano al nivel de potencia del ruido. En contraste, con el nivel de potencia recibida en el satélite que está alrededor  $9.47 \times 10^{-15}$  (femto) vatios y una SRN alrededor de 24dB.

Se comprobó que para mejorar la comunicación entre el satélite y la Estación, es necesario optimizar el sistema de comunicaciones en Tierra, ya que el sistema de comunicaciones en el satélite y los factores que determinan la potencia de la señal recibida como la distancia entre el satélite y la estación, las capas

atmosféricas de la Tierra, las interferencias del medio y las condiciones ambientales son características y/o variables sobre las que no se pueden ejercer control.

Cuando las antenas de estación apuntan hacia el satélite con pocos grados (entre 0° y 10°) de elevación, la señal recibida tiene la más baja potencia y demasiado ruido, esto se debe a las características del canal de comunicaciones y principalmente porque el satélite se encuentra a la distancia más alejada respecto a la estación, asimismo, los lóbulos laterales de la antena toman gran cantidad del ruido terrestre generado por fuentes que se encuentran en las proximidades de la estación como computadores, red eléctrica, entre otras; además, se suma el ruido cósmico generado por el Sol, estrellas y demás astros.

Se comprobó que es posible recibir en la estación señales de satélites utilizando antenas con polarización lineal. Pero, es importante aclarar que este tipo de polarización presenta pérdidas en potencia que están alrededor de 3dB, debido a que los vectores de campo eléctrico y magnético de la señal se acoplan parcialmente a la dirección instantánea del vector de los campos de la antena.

Con el fin de tener una base teórica firme para aplicar criterios de ingeniería en la implementación de la Estación Terrena, fué necesario volver a calcular el radioenlace, ya que el estudio previo (Diseño del sistema de comunicaciones de la estación terrena sede Neiva CUBESAT UD) presenta inconsistencias en el cálculo de los parámetros que caracterizan el canal de comunicaciones, tales como: la relación señal a ruido (S/N) y la energía de bit (Eb/No), ya que no se consideró de forma correcta la distancia máxima, el sistema de temperatura, la pérdida por polarización, pérdida por lluvias, pérdidas atmosféricas y las pérdidas por líneas de transmisión.

Debido a que las órbitas de los satélites cambian por diversos factores tales como la interacción con las fuerzas de gravedad entre la

Tierra y la Luna, las fuerzas de arrastre y otras, es importante que periódicamente la base de datos de los programas de predicción que contiene los elementos orbitales de los satélites, sea actualizada para que funcionen correctamente, de lo contrario se tiene errores en el seguimiento real del satélite.

Se desarrolló una metodología para la caracterización de las antenas a través de la aproximación de sus patrones de radiación. Como resultado de las mediciones se encontraron algunas alteraciones abruptas posiblemente producidas por interferencias que se presentan durante la medición. Aunque se trató de medir siguiendo las recomendaciones técnicas, no se cuenta con una cámara anecoica que aisle la prueba de interferencias o ruido externo; por tal motivo, se obtuvo una caracterización aproximada.

Es posible transmitir desde la estación hacia los satélites en la banda de 144-148MHz y 435-440MHz, porque el estudio de interferencias realizado muestra que las señales que pueden interferir en el radioenlace de subida están en los rangos de 145 hasta 145.5 MHz y de 146 hasta 146.2 MHz. Estas interferencias no son tan críticas, debido a que es la banda de transmisión de la estación terrena y podemos solucionar el problema de interferencia aumentando el nivel de la potencia de transmisión hasta el tope límite que tenga reglamentado el Ministerio de Comunicaciones.

Dentro de los equipos que se proponen es importante enfatizar que la adición de un amplificador de bajo ruido (LNA) aumentará la sensibilidad del sistema de comunicaciones y permitirá recibir señales más débiles de satélites que se encuentren a mayor altura y/o transmitan a menor potencia. Pero debe tenerse en cuenta que el LNA incrementa la señal y el ruido en la misma proporción, por eso es importante mejorar e incluir en el sistema los filtros que acondicionen la señal recibida.

Se propone la integración de las funciones de TX y RX en un solo radio. Para esto, se

recomienda usar un conmutador coaxial que permita alternar estas dos funciones, reduciendo la cantidad de equipos y con ello el presupuesto y espacio requeridos. Este conmutador coaxial adicionalmente permitirá invertir la polaridad de la señal cuando el satélite pase por el punto de elevación 90°.

De acuerdo a las pruebas y a la experiencia adquirida en el manejo de los equipos, dispositivos e instrumentos, se encontró que presentan algunos inconvenientes como en el caso de los radios (Kenwood TM-D700 –Yaesu FT-7800), los cuales presentan la desventaja de que el mínimo paso en frecuencia es de 5KHz imposibilitando la compensación continua de frecuencia para corregir el corrimiento por Doppler. También se encontró que el vatímetro de línea y el analizador de espectro no tienen la sensibilidad adecuada para medir los bajos niveles de potencia recibida.

Se concluye que el software PROETusco 1.0 realizado durante el desarrollo de este trabajo de grado, es una herramienta indispensable para el funcionamiento de la Estación USCO, porque permite controlar automáticamente las funciones de los radios, la posición del rotor, guardar y procesar la señal recibida (BEACON) y calcular los parámetros característicos del enlace. Aunque existen programas que realizan algunas de estas funciones de forma independiente, el reto fué lograr desarrollar e integrar éstas en un solo software. Esto permitió que el sistema fuera más eficiente, ya que el funcionamiento es armónico y sincronizado.