



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**

*La Universidad Católica de Loja*

## **ÁREA TÉCNICA**

**TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**Sistema de Comunicación satelital para la obtención de imágenes  
satelitales en alta definición (HRPT) usando SDR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**AUTORES:** Santos Orellana, Adrián Alexander  
Torres Piedra, Ronald Hernán

**DIRECTOR:** Quiñones Cuenca, Manuel Fernando, Ing.

**LOJA – ECUADOR**

**2016**



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

Septiembre, 2016

## APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Ingeniero.

Manuel Fernando Quiñones Cuenca

DOCENTE DE TITULACIÓN

De mi consideración:

Que el presente trabajo de titulación: “Sistema de Comunicación satelital para la obtención de imágenes satelitales en alta definición (HRPT) usando SDR”, realizado por los profesionales en formación: Santos Orellana Adrián Alexander y Torres Piedra Ronald Hernán; ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por lo cual se aprueba la presentación del mismo.

Loja, marzo del 2016

f) .....

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Nosotros, Santos Orellana Adrián Alexander y Torres Piedra Ronald Hernán, declaramos ser autores del presente trabajo de titulación: Sistema de Comunicación satelital para la obtención de imágenes satelitales en alta definición (HRPT) usando SDR, de la titulación de Electrónica y Telecomunicaciones, siendo el Ing. Manuel Fernando Quiñones Cuenca director del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Adicionalmente declaramos conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: "Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad".

f.....

Autor: Santos Orellana Adrián Alexander

Cédula: 0706279346.

f.....

Autor: Torres Piedra Ronald Hernán

Cédula: 1104191661.

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este trabajo a Dios quien me dio el don de la perseverancia para alcanzar esta meta, a mi madre quien ha dado razón a mi vida y ha sido el impulso durante toda mi carrera, que, gracias a su apoyo incondicional, consejos y paciencia he podido poder llegar a este punto de mi formación profesional, todo lo que soy es gracias a ella; a mis abuelos, hermana y novia que es lo mejor y más valioso que Dios me ha dado.

Adrián Santos

Dedico esta tesis a mi familia por su apoyo constante e incondicional a lo largo de estos años de estudio, de manera muy especial a mi madre Doris y hermana Diana, por sus consejos que me dieron la fuerza para seguir adelante sin desmayar, sin su ayuda habría sido imposible. A mi novia Diana, a mis hermanos: Diana, Gaby, Karen, Carlos, Anali, Katy, Arianna y a todos quienes de alguna u otra manera estuvieron junto a mí apoyándome para que yo pueda cumplir con éxito esta meta.

Ronald Torres Piedra

## **AGRADECIMIENTO**

A nuestros padres, ya que gracias a su apoyo y sacrificio durante todos estos años hemos logrado cumplir esta meta y convertirnos en lo que somos personal y profesionalmente. A nuestro amigo y director de tesis Ing. Manuel Quiñones que nos supo brindar su confianza, paciencia, tiempo y conocimientos para orientarnos en la realización y culminación de este trabajo. A nuestro docente y amigo Ing. Marco Morocho que nos supo contribuir con su experiencia y conocimientos necesarios para cumplir con los objetivos planteados.

Adrián Santos y Ronald Torres

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I.....	4
ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.1.    Objetivos. ....	5
1.1.1.    Objetivo general. ....	5
1.1.2.    Objetivos específicos.....	5
1.2.    Justificación.....	5
1.3.    Metodología.....	6
CAPÍTULO II.....	8
ESTADO DEL ARTE.....	8
2.1.    Introducción.....	9
2.1.1.    Componentes de un satélite. ....	9
2.1.2.    Asignación de frecuencias.....	10
2.2.    Tipos de satélites artificiales. ....	11
2.2.1.    Tipos de satélite según su órbita. ....	12
2.2.1.1.    Clasificación por altitud.....	12
2.2.1.2.    Clasificación según su inclinación.....	12
2.2.1.3.    Tipos de satélites según su misión. ....	13
2.3.    Satélites meteorológicos.....	13
2.3.1.    Satélites meteorológicos geoestacionarios.....	14
2.3.1.1.    Satélites GOES. ....	15
2.3.1.2.    Satélites Meteosat.....	16
2.3.1.3.    Satélites GOMS.....	16
2.3.2.    Satélites meteorológicos de órbita polar.....	17

2.3.2.1.	<i>Satélites METEOR.</i>	19
2.3.2.2.	<i>Satélite FY-1.</i>	19
2.3.2.3.	<i>Satélites NOAA.</i>	19
2.3.3.	HRPT de los satélites NOAA.	22
2.3.4.	Diferencias entre satélites de órbita polar y satélites geoestacionarios.	23
2.4.	Radio Definida por Software.	24
2.4.1.	Arquitectura de hardware SDR.	25
2.5.	Plataformas de hardware para SDR.	26
CAPÍTULO III.....		30
MATERIALES Y MÉTODOS.....		30
3.1.	Estación terrena.	31
3.2.	Sistema de seguimiento.....	34
3.2.1.	Rotor YAESU-G5500.....	34
3.2.1.1.	<i>Preparación y conexión.</i>	35
3.2.1.2.	<i>Control externo.</i>	35
3.2.2.	Software de SatPC32.	37
3.2.3.	Arduino Nano.....	38
3.2.4.	Circuito para el sistema de seguimiento automático.	38
3.2.5.	Pruebas del seguimiento automático de satélites.	39
3.3.	Sistema de recepción.	42
3.4.	Antenas.	43
3.4.1.	Antena Yagi.....	43
3.4.1.1.	<i>Diseño de la antena Yagi.</i>	43
3.4.1.2.	<i>Simulación de la antena Yagi.</i>	45
3.4.1.3.	<i>Implementación de la antena Yagi.</i>	46
3.4.2.	Antena helicoidal.	47
3.4.2.1.	<i>Diseño de la antena helicoidal.</i>	47
3.4.2.2.	<i>Cálculos de la antena helicoidal.</i>	49
3.4.2.3.	<i>Impedancia y acople de la antena helicoidal.</i>	51
3.4.2.3.1.	<i>Impedancia de una antena helicoidal.</i>	51
3.4.2.3.2.	<i>Acople de la antena helicoidal.</i>	51
3.4.2.4.	<i>Simulación de la antena helicoidal.</i>	53
3.4.2.5.	<i>Implementación de la antena helicoidal.</i>	54



3.4.3.	Antena parabólica.....	55
3.4.3.1.	<i>Simulación de la antena parabólica.</i> .....	56
3.4.3.2.	<i>Ganancia de la antena parabólica.</i> .....	57
3.4.4.	Comparación de las antenas. ....	59
3.4.5.	Mejoras en las antenas para la recepción.....	60
3.5.	Universal Software Radio Peripheral (USRP). ....	62
3.5.1.	Hardware del USRP N210.....	63
3.5.1.1.	<i>UHD.</i> .....	64
3.6.	GNURadio. ....	64
3.6.1.	<i>GNURadio Companion.</i> .....	66
3.7.	Sistema de recepción en <i>GNURadio Companion.</i> .....	67
3.8.	Software de visualización de Imágenes. ....	72
CAPÍTULO IV .....		74
PRESUPUESTO DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO.....		74
4.1.	Sistemas comerciales.....	75
4.1.1.	HRPT/CHRPT Weather Satellite System.....	75
4.1.2.	HRPT/AHRPT System.....	77
4.1.3.	HRPT Data Capture Engine.....	79
4.1.4.	MORCOM Weather Satellite Systems. ....	81
4.1.5.	Timestep Professional (C) HRPT AVHRR Systems. ....	82
4.2.	Costo del sistema propuesto. ....	84
CONCLUSIONES .....		87
RECOMENDACIONES.....		88
REFERENCIAS .....		89
ANEXOS.....		96
ANEXO A.....		97
ANEXO B.....		101
ANEXO C .....		107
ANEXO D .....		110
ANEXO E.....		119
ANEXO F.....		127
ANEXO G .....		130
ANEXO H .....		137

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Fases de desarrollo del trabajo de titulación. ....	7
Figura 2.1.- Subsistemas de un satélite de comunicación. ....	9
Figura 2.2.- Funciones básicas de un <i>transponder</i> . ....	10
Figura 2.3.- Satélites de órbita polar, orbita helio-síncrona y de orbita geo-síncrona. .	12
Figura 2.4.- Satélites meteorológicos con su procedencia. ....	14
Figura 2.5.- Cobertura del satélite Geoestacionario. ....	15
Figura 2.6.- Órbita polar.....	18
Figura 2.7.- Trayectoria de la órbita polar en la Tierra.....	18
Figura 2.8.- Principales sensores de los satélites de la serie NOAA. ....	21
Figura 2.9.- Comparación de geometrías geoestacionaria y polar. ....	24
Figura 2.10.- Diagrama de bloques funcionales de SDR.....	25
Figura 2.11.- Arquitectura <i>hardware</i> SDR. ....	25
Figura 3.1.- Diagrama general de una estación terrena tradicional. ....	31
Figura 3.2.- Diagrama del sistema propuesto usando SDR.....	33
Figura 3.3.- Rotor YAESU-G5500 y su controlador.....	34
Figura 3.4.- Esquema de conexión entre el rotor y el controlador. ....	35
Figura 3.5.- Pines del DIN-8 para control externo. ....	36
Figura 3.6.- Esquema básico para conexión entre Arduino y controlador.....	36
Figura 3.7.- Interfaz SatPC32. ....	37
Figura 3.8.- Arduino Nano, <i>PinOut Diagram</i> .....	38
Figura 3.9.- Circuito realizado en PCB <i>Wizard</i> . ....	39
Figura 3.10.- Placa del controlador del rotor en su <i>case</i> . ....	39
Figura 3.11.- Diagrama polar del pase. Satélite NOAA 19. ....	40
Figura 3.12.- Gráficas de Azimut y Elevación en función del tiempo. ....	41
Figura 3.13.- Gráficas de Error en Azimut y Elevación.....	41
Figura 3.14.- Azimut y Elevación de Software y Controlador.....	42
Figura 3.15.- Esquema de un receptor.....	42
Figura 3.16.- Elementos de una antena Yagi. ....	43
Figura 3.17.- Antena Yagi simulada en CADFEKO .....	45
Figura 3.18.- Vista 3D del patrón de radiación de la antena Yagi.....	46
Figura 3.19.- (a) Antena Yagi de 22 elementos. (b) Medición de ROE. ....	46
Figura 3.20.- ROE de la antena Yagi implementada. ....	47
Figura 3.21.- Dimensiones de la antena helicoidal. ....	48
Figura 3.22.- Relación entre circunferencia, espaciamiento.....	49
Figura 3.23.- Simulación de la antena helicoidal en CADFEKO. ....	53
Figura 3.24.- Vista 3D del patrón de radiación de la antena Helicoidal. ....	53
Figura 3.25.- Antena helicoidal implementada para 1,7 GHz. ....	54
Figura 3.26.- Medición del ROE de la antena Helicoidal. ....	54
Figura 3.27.- Simulación del disco parabólico en CADFEKO. ....	56
Figura 3.28.- Diagrama de Radiación y ganancia del disco parabólico. ....	56
Figura 3.29.- Antena parabólica con alimentador helicoidal. ....	57
Figura 3.30.- Generador de señales y analizador de espectros marca KEYSIGHT.....	58

Figura 3.31.- Recepción de señal con antena monopolo. ....	58
Figura 3.32.- Comparación de señales visualizadas en el analizador de espectros. ....	59
Figura 3.33.- Arreglo de antenas helicoidales. ....	60
Figura 3.34.- Simulación de arreglo de antenas helicoidales. ....	61
Figura 3.35.- (a) Disco parabólico WR-AX-400D. (b) Alimentador WR-AX-G400-PF. .	62
Figura 3.36.- Simulación de antena "WR-AX-400D" .....	62
Figura 3.37.- Panel frontal del USRP N210.....	63
Figura 3.38.- Integración de GNURadio con bibliotecas externas. ....	65
Figura 3.39.- Entorno gráfico de GNURadio <i>Companion</i> . ....	67
Figura 3.40.- Receptor desarrollado en GNURadio <i>Companion</i> .....	68
Figura 3.41.- Bloque de conexión de USRP.....	68
Figura 3.42.- Propiedades UHD: USRP Source. ....	69
Figura 3.43.-Bloque WX GUI FFT Sink. ....	70
Figura 3.44.- Bloque Moving Average GNURadio.....	70
Figura 3.45.- Moving Average en GNURadio.....	70
Figura 3.46.- Bloque Clock Revery MM.....	71
Figura 3.47.- Conexiones virtuales. (a) Virtual Source. (b) Virtual Sink. ....	71
Figura 3.48.- Desentramado, decodificación y generación del archivo <i>.hrpt</i> .....	72
Figura 3.49.- Interfaz de HRPT Reader.....	72

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Designación de bandas de frecuencia. ....	11
Tabla 2.2.-Información satélites meteorológicos geoestacionarios.....	17
Tabla 2.3.-Información satélites meteorológicos de órbita baja.....	19
Tabla 2.4.- Características del sensor AVHRR/3. ....	21
Tabla 2.5.- Tipos de resolución.....	22
Tabla 2.6.- Diferencias entre APT y HRPT.....	23
Tabla 2.7.- Comparación de alternativas para <i>hardware</i> SDR. ....	26
Tabla 2.8.- Plataformas de hardware SDR.....	27
Tabla 3.1.- Especificaciones técnicas Rotor YAESU-G5500.....	34
Tabla 3.2.- Datos de Azimut y Elevación del satélite NOAA 19 con fecha 19/02/16. ....	40
Tabla 3.3.- Longitudes de los directores. ....	44
Tabla 3.4.- Dimensiones de la antena Yagi para 1,7 GHz.....	44
Tabla 3.5.- Dimensiones recomendadas de antena helicoidal. ....	49
Tabla 3.6.- Cálculos para diseño antena helicoidal. ....	50
Tabla 3.7.- Dimensiones físicas de la antena Helicoidal .....	50
Tabla 3.8.- Parámetros de diseño del acoplador.....	53
Tabla 3.9.- Ganancia de las antenas implementadas.....	59
Tabla 3.10.- Especificaciones Antena WR-AX-400D.....	61
Tabla 4.1.- Especificaciones del sistema WSS-420 HRPT/CHRPT de WINRADIO.....	75
Tabla 4.2.- Componentes del sistema WSS-420 HRPT/CHRPT de WINRADIO .....	75
Tabla 4.3.- Especificaciones del sistema HRPT/AHRPT de DARTCOM. ....	78
Tabla 4.4.- Componentes del sistema HRTP/AHRPT de DARTCOM. ....	78
Tabla 4.5.- Especificaciones del sistema HRPT Data Capture Engine.....	79
Tabla 4.6.- Componentes del sistema HRTP Data Capture Engine. ....	80
Tabla 4.7.- Especificaciones del sistema MORCOM Weather Satellite Systems.....	81
Tabla 4.8.- Componentes del sistema MORCOM Weather Satellite Systems .....	81
Tabla 4.9.- Características del sistema TimeStep .....	83
Tabla 4.10.- Componentes del sistema TimeStep.....	83
Tabla 4.11.- Costo de los componentes del sistema propuesto .....	85

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se diseña un sistema de comunicación satelital, con el principal objetivo de obtener imágenes satelitales en alta resolución (HRPT) utilizando tecnología de Radio Definido por *Software* (SDR). Para cumplir con este propósito se utiliza el programa SatPC32 como *software* que permite el seguimiento automático de los satélites, rotor YAESU-G5500 para la orientación de las antenas, USRP N210 que utiliza una interfaz *Gigabit Ethernet* para la comunicación con el computador, Ubuntu 14.04 LTS (sistema operativo base), GNURadio en el cual se implementa el sistema de recepción y HRPT *Reader* para la decodificación de los archivos. Para este trabajo de titulación se diseña una estación terrena para la obtención de imágenes satelitales HRPT en frecuencias de la banda L (1.670-1.710 GHz).

**PALABRAS CLAVE:** SDR, GNURadio, URSP N210, HRPT, satélite meteorológico, recepción de imágenes.

## **ABSTRACT**

In the present research, a satellite communication system is designed, with the main objective of obtaining satellite images in high resolution (HRPT) using technology of Software Defined Radio (SDR). To fulfill this purpose has been used SatPC32 as software program that allows automatic tracking of satellites, YAESU-G5500 rotor to the orientation of the antenna, USRP N210 that uses a Gigabit Ethernet interface for communication with the computer, Ubuntu 14.04 LTS (base operating system), GNURadio in which the receiving system was designed and HRPT Reader to decode the files. For the present project an earth station it has designed to obtain HRPT satellite images in L band frequencies (1670-1710 GHz).

**KEYWORDS:** SDR, GNURadio, URSP N210, HRPT, weather satellite, image reception.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo del trabajo de titulación se basa en el seguimiento automático, la recolección, demodulación y decodificación de las señales digitales HRPT transmitidas por los satélites meteorológicos de órbita polar, en la banda L, principalmente de los satélites puestos en órbita por la Agencia Federal de Administración Atmosférica y Oceánica Nacional (NOAA).

La importancia del presente trabajo de titulación se basa en la necesidad de tener a disposición un sistema de alerta ante la presencia de fenómenos naturales, con ayuda de una serie de imágenes satelitales con una resolución temporal adecuada, ya que con la pronta detección de los mismos se pueden prevenir pérdidas materiales y en casos extremos pérdidas humanas en las zonas de mayor impacto y además pueden ayudar al estudio y análisis de fenómenos provocados por el hombre como la deforestación, desertificación, incendios forestales y más información de interés sobre el medio ambiente de grandes áreas geográficas.

En el primer capítulo se establecen los objetivos del trabajo de titulación, la justificación y la metodología planteada para poder obtener imágenes satelitales en alta resolución (HRPT) utilizando tecnología de Radio Definido por *Software* (SDR). El segundo capítulo corresponde al estado del arte donde se realiza una investigación de los conceptos básicos necesarios para comenzar con el desarrollo de los objetivos planteados en base a proyectos similares. En el tercer capítulo se explican los materiales y métodos seleccionados para el diseño de todos los sistemas que conforman el trabajo de titulación y finalmente en el cuarto capítulo se expone el funcionamiento de todo el sistema, así como las conclusiones y recomendaciones.

**CAPÍTULO I**  
**ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**



## **1.1. Objetivos.**

### **1.1.1. Objetivo general.**

Diseñar un sistema de comunicación para la obtención de imágenes satelitales meteorológicas en alta definición (HRPT) usando tecnologías de radio definida mediante *software* (SDR).

### **1.1.2. Objetivos específicos.**

- Diseñar mediante una plataforma de Radio Definido por *Software* (SDR) un sistema de recepción con el uso de USRP para obtención de imágenes satelitales.
- Diseñar e implementar un sistema de radiación necesario para captar las señales emitidas por los satélites meteorológicos.
- Implementar un sistema de control para el seguimiento automático de los satélites meteorológicos.
- Evaluar los componentes del sistema de obtención de imágenes satelitales en alta resolución *High Resolution Picture Transmission* (HRPT).

## **1.2. Justificación.**

En nuestro planeta Tierra a diario se presentan una serie de fenómenos naturales tales como huracanes, precipitaciones, cambios de temperatura, actividad de volcanes, etc., que pueden provocar pérdidas materiales y en casos extremos pérdidas humanas en zonas de mayor impacto, es por este motivo que sería importante tener a disposición un sistema que ayude a prevenir estos daños con la pronta detección de los fenómenos mencionados. Una forma de lograrlo es obteniendo una serie de imágenes tomadas por satélites meteorológicos a la superficie terrestre con una alta resolución temporal ya que estas imágenes también pueden ayudar al estudio y análisis de fenómenos provocados por el hombre en determinadas áreas geográficas.

Es por estos motivos por los cuales se desarrolla el presente trabajo de investigación y diseño del sistema mencionado, demostrando que es posible de una manera eficiente, y con un bajo costo, diseñar un sistema de recepción de imágenes captadas por los satélites meteorológicos NOAA 15, 18, 19 que se encuentran orbitando el planeta.

### 1.3. Metodología.

Durante el presente trabajo de titulación se utiliza una metodología de avance por fases, que se detalla a continuación:

1. La primera fase a realizar consiste en la recolección de información para la ejecución del trabajo de titulación, es decir recopilación de datos de los satélites meteorológicos, frecuencias de operación en HRPT, tipo de señal emitida por los mismos, la decodificación de señales emitidas por estos satélites, sistema de radiación, el control del rotor para el seguimiento automático de los satélites meteorológicos. Con lo mencionado anteriormente se determina las herramientas de *hardware* y *software* necesarios para cumplir con el objetivo.

2. La segunda fase comprende el diseño y construcción del sistema de radiación óptimo que cumpla con las características de ganancia, directividad, frecuencia de operación y polarización.

En lo que respecta a *software* se realiza la instalación del sistema operativo Ubuntu, sobre el cual se instala todos los programas y *drivers* necesarios. En este sistema operativo se instala el *software* GNURadio, el que sirve como plataforma para el desarrollo del sistema de recepción.

3. La tercera fase se enfoca a la documentación de todos los pasos seguidos para el diseño, implementación y pruebas de los componentes del sistema.

La metodología a seguir se resume en el esquema de la figura 1.1.

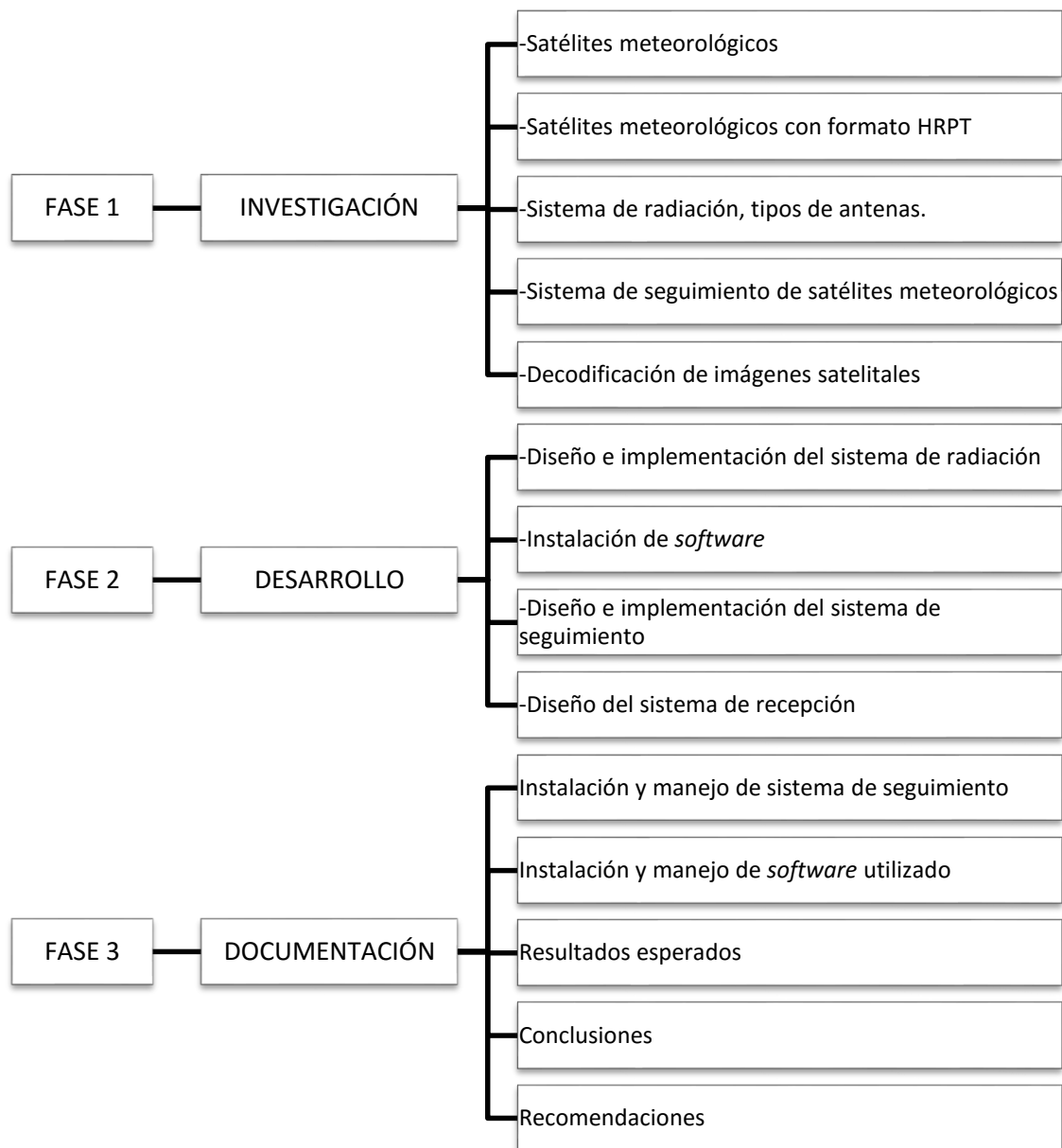


Figura 1.1.- Fases de desarrollo del trabajo de titulación.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

**CAPÍTULO II**  
**ESTADO DEL ARTE**

## 2.1. Introducción.

El periodo orbital de los satélites depende de la distancia en que estos se encuentran hasta a la Tierra, es decir, que cuando más cerca esté el satélite de la Tierra más corto es el periodo orbital. Existe una altura en que el periodo orbital del satélite coincide exactamente con el de rotación de la Tierra. Vistos desde la Tierra, los satélites que giran en esta órbita parecen estar inmóviles en el cielo, por lo que se les llama satélites geoestacionarios. Los satélites se mantienen en órbita ya que la atracción gravitatoria de la Tierra contrarresta a la fuerza centrífuga [1].

En la actualidad, aún con el notorio avance en el uso de medios de alta capacidad y calidad como las fibras ópticas, y de los nuevos servicios inalámbricos, se puede prever que los servicios por satélite seguirán siendo competitivos y de gran utilidad, evolucionando también a nuevas aplicaciones [2].

### 2.1.1. Componentes de un satélite.

Un satélite puede dividirse en dos partes fundamentales para su operación: el conjunto de equipos y antenas que procesan las señales de comunicación de los usuarios, denominado carga útil o de comunicaciones, y la estructura de soporte, con otros elementos de apoyo, denominada plataforma [2]. La plataforma puede dividirse para su análisis funcional en varios subsistemas que apoyan la operación satisfactoria de la carga de comunicaciones como muestra la figura 2.1

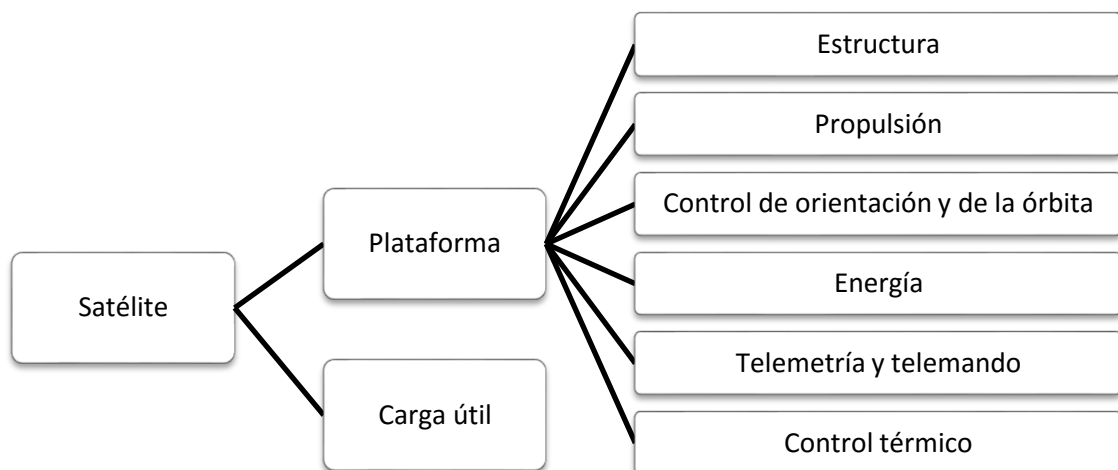


Figura 2.1.- Subsistemas de un satélite de comunicación.  
Fuente: Imagen propia de los autores, basado en [2].

### 2.1.2. Asignación de frecuencias.

Las diversas bandas de frecuencias que pueden usar los satélites son definidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), cada banda de frecuencias puede ser utilizada simultáneamente por varios países para satisfacer las necesidades mundiales de comunicación, esto con las debidas precauciones técnicas para evitar interferencias, las mismas que puedan originarse, entre otras causas, por la dificultad de limitar las radiaciones solo a las áreas de servicio. Se puede realizar una planificación regional entre los países que quieran hacer uso simultáneo de toda una banda de frecuencia, registrada y aprobada por la UIT para evitar interferencias mutuas a los servicios de dos países cercanos, que pueden ser complementadas por convenios bilaterales [2].

Un satélite puede operar en una o más de las bandas atribuidas, dependiendo de las necesidades de capacidad de tráfico, de los servicios que se presten, en cierta medida de las condiciones climáticas de la zona de servicio, y de las posibilidades técnicas de ocupación de una órbita o de una posición orbital sin causar interferencias a otros satélites. Cada banda de frecuencias dispone de una parte del espectro para los enlaces ascendentes Tierra-satélite y otra para los enlaces descendentes satélite-Tierra, a fin de evitar interacciones inconvenientes. Cada unidad básica de la carga útil o *transponder* recibe las emisiones desde la Tierra como enlaces ascendentes, las amplifica para compensar la enorme pérdida en el espacio, realiza la transposición o conversión de sus frecuencias y las devuelve a Tierra como enlaces descendentes, operando en fracciones diferentes de la banda que los demás *transponder*, como muestra la figura 2.2 [2].



Figura 2.2.- Funciones básicas de un *transponder*.  
Fuente: Imagen propia de los autores, basado en [2].

La porción del espectro de radiofrecuencias atribuido por la UIT a la comunicación por satélite comprende porciones en el intervalo que va aproximadamente de 0,1 a 400 GHz para cada uno de los tipos de servicio móvil por satélite (SMS), fijo por satélite (SFS), difusión (SRS), o entre satélites (SES). Actualmente, más del 90% de la capacidad de

comunicación en órbita para fines comerciales se utiliza para el servicio fijo por satélite, en la gama de frecuencias de 3,4 a 14,8 GHz (principalmente en las llamadas bandas C y Ku), considerando el número de satélites que las emplean y la reutilización de frecuencias en varios de ellos [2].

Para sus propios fines reglamentarios, la UIT considera tres regiones en el mundo:

- La región 1, que comprende África, países árabes y Europa.
- La región 2, que comprenden países de América.
- La región 3, que incluye a Asia y Oceanía, existiendo algunas diferencias menores en la atribución de frecuencias para cada región y excepciones registradas por países en forma individual [2].

Las principales bandas para los servicios por satélite son las mostradas en la Tabla 2.1 para la región 2 (América) [2].

Tabla 2.1.- Designación de bandas de frecuencia.

<b>Banda</b>	<b>Ejemplos de atribución (GHz)</b>	<b>Designación</b>
L	1,525-1,71	Banda de 1,5 GHz
S	1,99-2,20	Banda de 2 GHz
	2,5-2,69	Banda de 2,5 GHz
C	3,4-4,2 4,5-4,8	Banda de 4/6 GHz
	5,15-5,25, 5,85-7,075	Banda de 5/7 GHz
X	7,2-8,4	Banda de 7/8 GHz
Ku	10,7-13,25, 13,75-14,8	Banda de 11/14 GHz, Banda de 12/14 GHz
Ka	27,0-31,0	Banda de 30 GHz

Fuente: Tomado de [2].

## **2.2. Tipos de satélites artificiales.**

Se pueden clasificar los satélites artificiales utilizando dos de sus características, según su órbita y según su misión.

## 2.2.1. Tipos de satélite según su órbita.

### 2.2.1.1. Clasificación por altitud.

- **Órbita Terrestre Baja (LEO):** Se encuentran entre 500 y 1.500 km de altitud [2].
- **Órbita Terrestre Media (MEO):** Se encuentran a una altura de entre 10.075 km. y 20.150 km. A diferencia de los de Órbita Terrestre Alta (GEO) su posición relativa respecto a la Tierra no es fija [3].
- **Órbita Terrestre Alta (GEO):** También conocida como órbitas terrestres geo-síncronas, la órbita GEO está situada a 36.000 km de altura, con una latitud de  $0^\circ$ , es decir, situada sobre el ecuador [3].

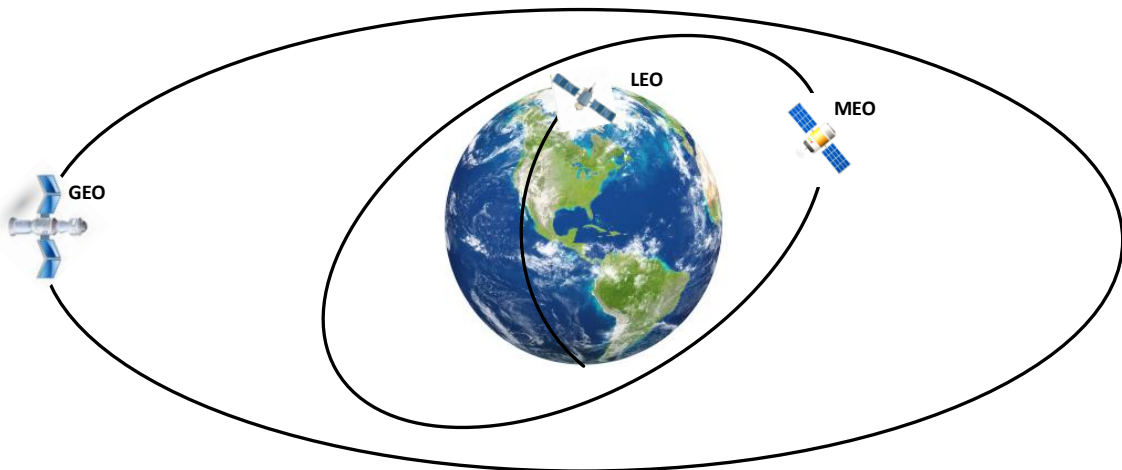


Figura 2.3.- Satélites de órbita polar, órbita helio-síncrona y de órbita geo-síncrona.  
Fuente: Imagen propia de los autores, basada en [4].

### 2.2.1.2. Clasificación según su inclinación.

- **Órbita inclinada:** En este curso la trayectoria del satélite sigue un plano con un cierto ángulo de inclinación respecto al Ecuador [5], estos tipos de órbitas a su vez se clasifican en:
  - ✓ **Órbita polar:** En este tipo de órbita el satélite sigue un plano paralelo al eje de rotación de la Tierra pasando sobre los polos y perpendicular al Ecuador, por tanto, tiene una inclinación de  $90^\circ$  o aproximada [5].
  - ✓ **Órbita polar helio-síncrona:** Una órbita casi polar que pasa por el ecuador terrestre a la misma hora local en cada pasada [6].



### **2.2.1.3. Tipos de satélites según su misión.**

- **Satélites de reconocimiento:** Denominados popularmente como satélite espía (confeccionado con la misión de registrar movimiento de personas), son satélites de observación o comunicaciones utilizados por militares u organizaciones de inteligencia.
- **Satélites astronómicos:** Son satélites utilizados para la observación de planetas, galaxias y otros objetos astronómicos.
- **Satélites de comunicaciones:** Son los empleados para el servicio de telecomunicaciones, estos satélites suelen utilizar órbitas geo-síncronas y órbitas bajas terrestres.
- **Estaciones espaciales:** Grandes construcciones espaciales colocados en órbita alrededor de la Tierra con el fin de desarrollar actividades de investigaciones por parte de tripulaciones humanas permanentes o semipermanentes [7].
- **Satélites Meteorológicos:** Son satélites utilizados principalmente para registrar el tiempo atmosférico y el clima de la Tierra [8].

### **2.3. Satélites meteorológicos.**

Los satélites meteorológicos son satélites artificiales que se utilizan principalmente para supervisar el clima de la Tierra, estos satélites proporcionan datos actualizados permanentemente de las condiciones meteorológicas que afectan a grandes áreas geográficas, además, sirven para controlar desastres como incendios forestales, la contaminación atmosférica, las corrientes del océano, las tormentas de arena y polvo, y otros tipos de información importante para el monitoreo del medio ambiente. De forma agrupada, los satélites meteorológicos de China, Estados Unidos, Europa, India, Japón y Rusia proporcionan una observación casi continua del estado global de la atmósfera como lo muestra la figura 2.4. Los servicios de predicción meteorológica dependen del flujo constante de imágenes tomadas por estos satélites [9] [10].

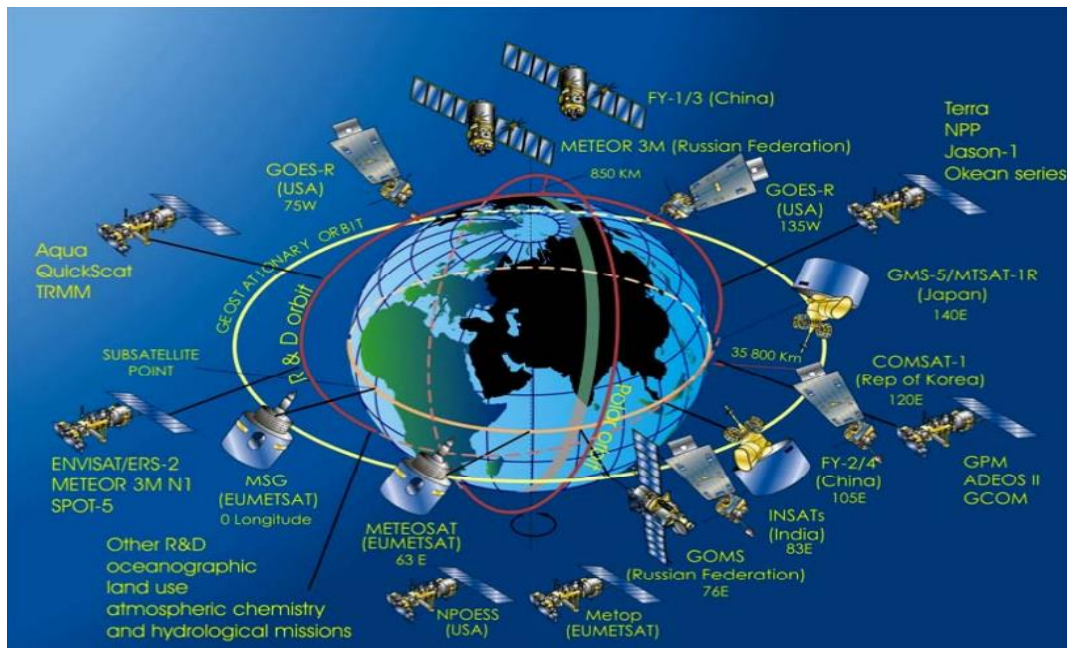


Figura 2.4.- Satélites meteorológicos con su procedencia.  
Fuente: Tomada de [11].

Actualmente existen dos grandes grupos de satélites meteorológicos:

- ✓ El primer grupo se compone de los satélites geoestacionarios, que se encuentran sobre la línea ecuatorial como la serie GOES (*Global Operational Environmental Satellite*) de la agencia norteamericana NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) [12].
- ✓ El segundo grupo lo componen los satélites de órbita polar, que como su nombre lo indica orbitan la Tierra de polo a polo, como la serie NOAA [13].

En las imágenes captadas por los satélites meteorológicos se puede visualizar nubes, vapor de agua existente en la alta y media atmósfera, así mismo se puede calcular o estimar temperaturas de la superficie de Tierra, temperatura superficial del mar, etc. [10].

### 2.3.1. Satélites meteorológicos geoestacionarios.

Este tipo de satélite rota en torno a la Tierra sincronizados con su velocidad de rotación, es decir, que acompañan en su velocidad de rotación a la Tierra y por consiguiente se encuentran situados siempre en un mismo punto sobre la superficie terrestre [14]. Igualando la fuerza centrífuga del satélite con su fuerza gravitatoria se logra que el satélite geoestacionario se mantenga a una distancia fija de 36.000 km de altura aproximadamente (ver figura 2.5) [15].

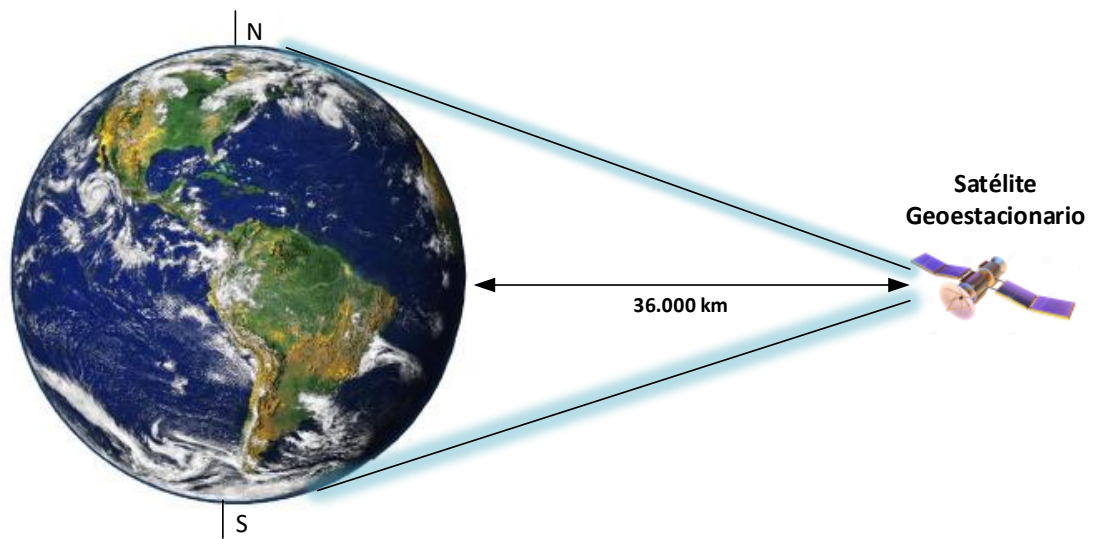


Figura 2.5.- Cobertura del satélite Geoestacionario.

Fuente: Imagen propia de los autores, basado en [10].

Los satélites GEO giran en el mismo sentido que la Tierra a una velocidad orbital de 3,075 km/s, esta velocidad permite que el satélite se mantenga en su órbita, de otra forma, con una velocidad menor, el satélite sería atraído a la Tierra, y, por el contrario, teniendo una velocidad mayor, el satélite podría salir de la órbita alejándose de la Tierra [16].

A continuación, se explican aquellos satélites meteorológicos que cubren la zona de América:

### 2.3.1.1. Satélites GOES.

Los satélites GOES americanos, operados por NOAA ven siempre la misma porción del globo (42% de la superficie de la Tierra). Poseen un radiómetro que barre línea por línea la superficie de la Tierra a medida que la satélite gira o rota sobre su eje. Hasta la fecha han sido lanzado cinco satélites GOES los cuales son administrados por agencias norteamericanas. Estos satélites fueron construidos para medir la temperatura del agua en la superficie, para examinar la actividad solar, medir los rayos X, la energía de los protones y electrones emitidos, y el campo magnético [10] [14].

Estos satélites cuentan con un dispositivo denominado "GOES *Imager*" el cual cuenta con 5 canales: el canal visible es 0,55-0,75  $\mu\text{m}$ , los canales infrarrojos son 3,8-4,0  $\mu\text{m}$ , 10,2-11,2  $\mu\text{m}$ , 11,5-12,5  $\mu\text{m}$  y el canal de vapor de agua es 6,5-7,0  $\mu\text{m}$ . En el canal visible (VIS) da 1 km de resolución. En los canales infrarrojo (IR) la resolución es de 4

km. En el canal de vapor de agua (VA) la resolución es de 8 km. Estas mediciones digitales se cifran y se transmiten a la estación terrena para procesarla antes de ser entregada a la comunidad para su utilización. Los datos son distribuidos por el NESDIS (*National Environmental Satellite and Information Service*) [10] [14].

### **2.3.1.2. Satélites Meteosat.**

Son satélites geoestacionarios europeos operados por la EUMESAT (Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos). Tiene la función de recoger información para deducir las temperaturas de la superficie del mar, la dirección del movimiento de las nubes, la temperatura y altitud máxima de las nubes, y la humedad en la troposfera superior [10].

Los Meteosat están equipados con un radiómetro que explora la Tierra línea por línea; cada línea consiste en una serie de elementos de imagen o de píxeles. Para cada píxel el radiómetro mide la energía radiada de las diversas gamas espectrales. Esta medida digital se cifra y se transmite a la estación de Tierra para procesada antes de ser entregada para ser usada por la comunidad [14].

### **2.3.1.3. Satélites GOMS.**

Los *Geostationary Operational Meteorological Satellite* (GOMS) son satélites geoestacionarios operados SRC (*State Research Center*), fueron lanzados el 31 de octubre de 1994 [10]. Estos satélites al igual que los anteriores ven siempre la misma porción del globo [14]. El GOMS está equipado con un radiómetro STR (*Satellite Time Reference*). El radiómetro explora la Tierra línea por línea; cada línea consiste en una serie de elementos de imagen o de píxeles. Para cada píxel el radiómetro mide la energía radiada de las diversas gamas espectrales. Esta medida digital se cifra y se transmite a la estación de Tierra para procesada antes de ser entregada a la comunidad para su utilización [10] [14] [17].

El STR es un instrumento de 3 canales: el canal visible es 0,46-0,7  $\mu\text{m}$ , el canal infrarrojo es 10,5-12,5  $\mu\text{m}$  y el canal vapor de agua es 6,0-7,0  $\mu\text{m}$ . En el canal visible, la resolución es 1,25 kilómetros. En los canales infrarrojos y vapor de agua, la resolución es 6,25 km. [10] [14].

En la Tabla 2.2 se hace una comparación de la información de los satélites anteriormente mencionados:

Tabla 2.2.-Información satélites meteorológicos geoestacionarios.

Organización	Nombre del satélite	Polarización	Servicio	Frecuencia (MHz)	Velocidad de datos o Banda Base	Ancho de Banda
<i>National Weather Service (NWS) de la NOAA.</i>	GOES-13	Linear	LRIT (Digital)	1.691	128 kbps	660 kHz
	GOES-15					
Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMESAT)	METEOS AT-10	Linear	HRIT (Digital)	1.695,15	1.000 kbps	2 MHz
	METEOS AT-11		LRIT (Digital)	1.691	128 kbps	660 kHz
<i>Russian Federal Space Agency</i>	ELECTRO-L N1	RHCP	HRIT (Digital)	1.691	665,4 kbps	2 MHz
	ELECTRO-L N2		HRIT (Digital)	1.693	665,4 kbps	2 MHz
	ELECTRO-L N3		LRIT (Digital)	1.691	64 kbps	200 kHz

Fuente: Tabla propia de los autores, basado en [18].

### 2.3.2. Satélites meteorológicos de órbita polar.

El plano de un satélite de órbita polar está ligeramente inclinado respecto al eje de rotación de la Tierra por dos motivos: por una parte, debido a la imperfección de la esfera terrestre, lo que provoca una variación en la trayectoria del satélite, y por otra, para buscar una precesión en el plano de la órbita de forma que el satélite cuando pase por un determinado punto de la superficie se encuentre en una posición fija respecto a la iluminación de la luz solar lo más adecuada posible. Así si la precesión es de 360 al año, la órbita siempre estará en el mismo plano respecto al sol.

En la figura 2.6 se puede observar las características orbitales de estos satélites. El satélite sigue en órbita casi en el mismo plano a lo largo del día, mientras que la Tierra gira debajo de ella, el resultado es un camino de Tierra en órbitas diferentes posteriores resultantes de la cobertura total de la Tierra dos veces por día.

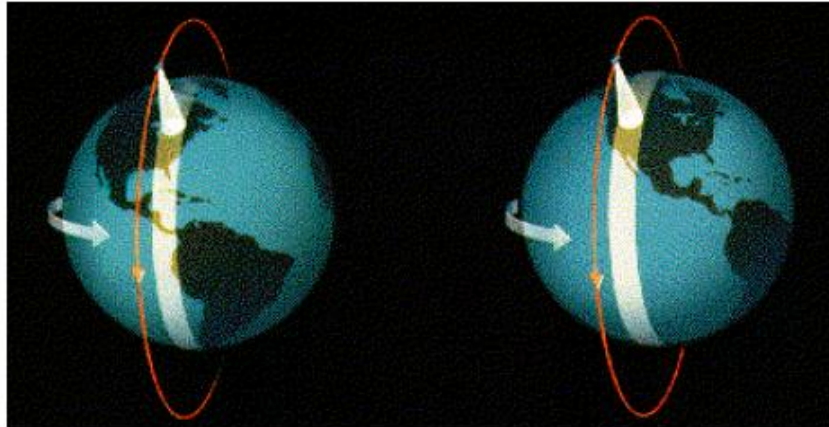


Figura 2.6.- Órbita polar  
Fuente: Tomada de [19].

La figura 2.7 muestra la cobertura satelital de la superficie de la Tierra para una sola órbita e ilustra el desplazamiento causado por la rotación de la Tierra [19].

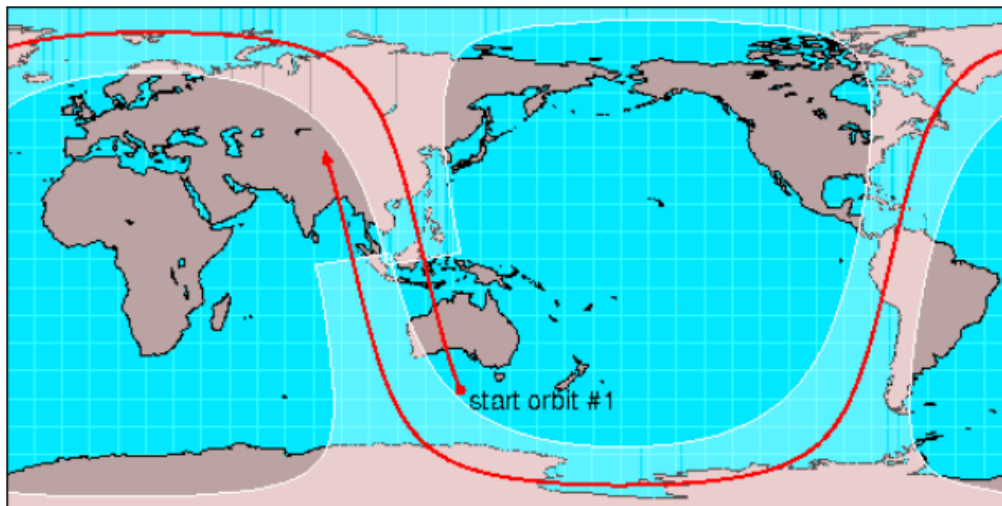


Figura 2.7.- Trayectoria de la órbita polar en la Tierra.  
Fuente: Tomada de [19].

Las principales ventajas de este tipo de satélites son:

- ✓ La órbita es muy baja (850 km de altura) por lo que la resolución espacial de los datos tomados por los sensores es mejor (entre 0,5 y 1,2 km) en comparación con los de órbita geoestacionaria.
- ✓ Al pasar siempre a la misma hora sobre cada punto cada día y cada noche la radiación solar sobre las superficies a observar va a ser muy uniforme.
- ✓ Con un solo satélite se puede cubrir toda la Tierra en 12 horas [15].

Algunos de estos satélites son de origen ruso (Meteor), chino (FY-1) y estadounidense (NOAA, QuikSCAT) [14].

### 2.3.2.1. Satélites METEOR.

Los satélites METEOR son satélites rusos de órbita polar y están operados por la Agencia Espacial Rusa. La altitud de estos satélites es de cerca de 1.200 km. Los satélites METEOR tienen como objetivo tomar medidas de la temperatura del agua y a varios niveles de la atmósfera. Puede proporcionar dos veces al día información sobre la distribución de las nubes y la nieve, con imágenes en la banda visible y en la de infrarrojo; información global sobre la distribución de la temperatura, altura de las nubes y temperatura del agua del mar, dos veces al día [10] [14].

### 2.3.2.2. Satélite FY-1.

Los FY-1 son satélites chinos de órbita polar. El operador es el NSMC (*National Satellite Meteorological Center*). Se encuentran a una altitud de 870 km. Cada órbita completa alrededor de la Tierra tarda 100 minutos y realiza 14 órbitas al día. Estas órbitas son sincronas con el sol. Los FY-1 están equipados con un radiómetro MVISR (*Multichannel Visible and IR Scan Radiometer*). [10].

### 2.3.2.3. Satélites NOAA.

Son satélites norteamericanos de órbita polar operados por la NOAA. Cada órbita completa alrededor de la Tierra dura 102 minutos lo que significa que cada día se completan 14,1 órbitas. Dado que el número de órbitas por día no es entero, el paso del satélite sobre un determinado punto sub-orbital no se repite día a día. Estos satélites tienen un desfase en sus órbitas; sobre cada punto de la superficie terrestre se producen 4 pasadas con un intervalo aproximado de 6 horas entre ellas. Los satélites NOAA tienen como objetivo medir la temperatura y la humedad atmosférica, la temperatura de la superficie terrestre, la temperatura en la superficie de los mares identificando la nieve y el hielo, estudio de la distribución de las nubes y las características de las partículas atómicas emitidas por el sol midiendo la densidad del flujo de protones, electrones y otras partículas procedentes del planeta [10].

En la tabla 2.3 se resumen algunos datos e información acerca de los satélites meteorológicos de órbita baja anteriormente mencionados:

Tabla 2.3.-Información satélites meteorológicos de órbita baja.

Organización	Nombre del satélite	Polarización	Servicio	Frecuencia (MHz)	Velocidad de datos o Banda Base	Ancho de Banda
<i>National Oceanic and Atmospheric</i>	NOAA-15	RHCP	HRPT (Digital)	1.698	665 kbps	4 MHz

<i>Administration (NOAA)</i>		RHCP	APT (Analogico)	137,62	1,7 kHz	38 kHz
<i>National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)</i>	NOAA-18	LHCP	HRPT (Digital)	1.702,5	665 kbps	4 MHz
		RHCP	HRPT (Digital)	1.707	665 kbps	4 MHz
			APT (Analogico)	137,9125	1,7 kHz	38 kHz
<i>National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)</i>	NOAA-19	LHCP	HRPT (Digital)	1.702,5	665 kbps	4 MHz
		RHCP	HRPT (Digital)	1.698	665 kbps	4 MHz
			APT (Analogico)	137,1	1,7 kHz	38 kHz
<i>Agencia Espacial Rusa</i>	Meteor-M N1	RHCP	AHRPT (Digital)	1.700	3.000 kbps	3 MHz
			APT (Analogico)	137,15	1,7 kHz	50kHz
			LRPT (Analogico)	137,1	80 kbps	150kHz
<i>Agencia Espacial Rusa</i>	Meteor-M N2	RHCP	AHRPT (Digital)	1.700	3.000 kbps	3 MHz
			APT (Analogico)	137,15	1,7 kHz	50kHz
			LRPT (Analogico)	137,1	80 kbps	150kHz
<i>National Satellite Meteorological Center (NSMC).</i>	Feng Yun FY-3A	RHCP	AHRPT (Digital)	1.704,5	4.200 kbps	6,8 MHz
<i>National Satellite Meteorological Center (NSMC).</i>	Feng Yun FY-3B	RHCP	AHRPT (Digital)	1.704,5	4.200 kbps	6,8 MHz
<i>National Satellite Meteorological Center (NSMC).</i>	Feng Yun FY-3C	RHCP	AHRPT (Digital)	1.701,3	4.200 kbps	6,8 MHz
<i>National Satellite Meteorological Center (NSMC).</i>	Feng Yun FY-3D	RHCP	AHRPT (Digital)	7.820	60 Mbps	100MHz

Fuente: Tabla propia de los autores, basado en [18].

Los satélites NOAA 15, 18 y 19 incluyen sensores para analizar datos relativos al clima, así como instrumentos para soportar tareas de investigación internacional. El sistema de seguimiento y rescate por satélite, llamado COPAS-SARSAT (*The Search and Rescue Satellite-Aided Tracking System*) transmite a las estaciones de Tierra el lugar



de emergencias de barcos, aviones, es decir, de personas en peligro. El programa que se lleva desarrollando desde 1982, ha salvado incontables vidas [20].

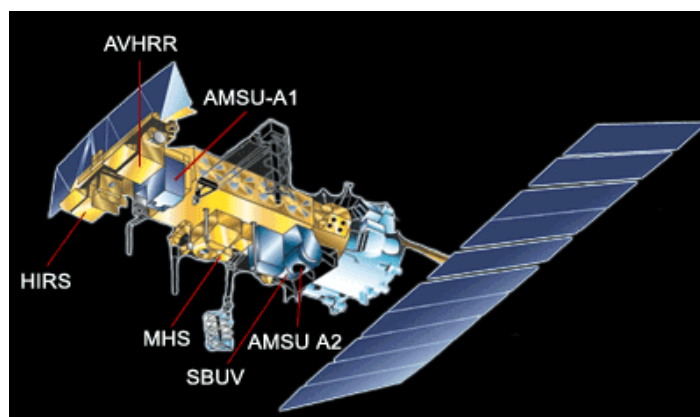


Figura 2.8.- Principales sensores de los satélites de la serie NOAA.  
Fuente: Tomada de [21].

Como se puede ver en la figura 2.8 los satélites NOAA cuenta con los siguientes sensores:

- ✓ El sensor AVHRR/3 (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) posee cinco canales espectrales, mostrados en la tabla 2.4, que trabajan en las bandas visible e infrarroja del espectro electromagnético. En las bandas visibles (VIS) y del infrarrojo cercano (NIR) se detecta la capacidad reflectora de las superficies y en las infrarrojas la radiación térmica de ellas desde la Tierra, mar y nubes.

Tabla 2.4.- Características del sensor AVHRR/3.

Canal	Micras	Descripción
1	0,58-0,68	Luz visible, nubes diurnas, cartografía de la superficie
2	0,725-1,10	Desalineación de superficies cubiertas por agua
3A	1,58-1,64	Detección de nieve y hielo
3B	3,55-3,93	Temperaturas del océano e incendios forestales mayores
4	10,5-11,5	Mapeo de la superficie del mar y nubes de día o de noche
5	11,5-12,5	Mapeo de la superficie e del océano, muy similares a las aplicaciones del canal 4

Fuente: Tomado de [22].

- ✓ El HIRS/4 (*High Resolution Infrared Radiation Sounder*), es un sondeador atmosférico que suministra datos en un canal visible, siete canales de onda corta y doce de onda larga.
- ✓ El AMSU-A (*Advanced Microwave Sounding Unit*), es un radiómetro de

microondas encaminado que junto con el HIRS toma medidas de superficie y precipitación, entre ellas la cobertura de las nubes, hielo en el mar y humedad del suelo.

- ✓ El MHS (*Microwave Humidity Sounder*), es un nuevo instrumento que mide los perfiles de humedad de la atmósfera. Adicionalmente, puede detectar el contenido de agua líquida y la intensidad de precipitación.
- ✓ El SBUV/2 (*Solar Backscatter Ultraviolet Radiometer*), es un radiómetro de ultravioleta que trata de medir la irradiación del sol y de la Tierra en la zona de longitudes de onda del ultravioleta cercana [21].

Los satélites meteorológicos NOAA están equipados con dos mecanismos de envío de imágenes. El primero denominado APT (*Automatic Picture Transmission*) y el segundo conocido como HRPT (*High Resolution Picture Transmission*).

### 2.3.3. HRPT de los satélites NOAA.

El formato APT da un tamaño de píxel de 4 kilómetros y por lo tanto un área de 16 kilómetros cuadrados por píxel, por otro lado, HRPT da un tamaño de píxel de 1,1 kilómetros y por lo tanto una superficie de 1,21 kilómetros cuadrados por píxel, un increíble aumento de 13 veces la resolución espacial. Sin embargo, 1,1 km es considerada baja resolución espacial en comparación con satélites como Landsat<sup>1</sup> o QuickBird<sup>2</sup>. En la tabla 2.5 se indica los diferentes tipos de resolución de estos satélites en comparación con los NOAA.

Tabla 2.5.- Tipos de resolución.

	NOAA	Landsat	Quickbird
Resolución Espacial	Baja (1,1 km)	Media (5-30 m.)	Alta (0,6 m.)
Resolución Espectral	5 canales espectrales	7 canales espectrales	4 canales espectrales
Resolución Radiométrica	2 <sup>10</sup> =1.024 niveles	2 <sup>8</sup> =256 niveles	2 <sup>11</sup> =2.048 niveles
Resolución Temporal	12 horas	16 días	2-3 días

Fuente: Tabla propia de los autores, basado en [23] [24] [25] [26]

En la tabla 2.6 se presentan las diferencias entre los formatos APT y HRPT.

<sup>1</sup> <http://geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/l7.html>

<sup>2</sup> <http://www.satimagingcorp.es/gallery-quickbird.html>

Tabla 2.6.- Diferencias entre APT y HRPT.

	<b>APT</b>	<b>HRPT</b>
<b>Frecuencias de transmisión</b>	137,50 MHz 137,62 MHz 137,1 MHz 137,9125 MHz	1.698 MHz 1.707MHz 1.702,5 MHz
<b>Polarización de la antena</b>	Polarización Circular Mano Derecha (RHCP)	Polarización Circular Mano Derecha (RHCP), Polarización Circular Mano Izquierda (LHCP).
<b>Modulación de la portadora de RF</b>	Analógica AM/FM	Digital, <i>Split Phase</i> , Fase Modulada
<b>Ancho de Banda de la emisión</b>	34 khz	3,5 MHz
<b>Líneas por trama</b>	120 líneas/minuto (2 líneas/segundo)	6 líneas/segundo (360 líneas/minuto)
<b>Palabras Digitales por Línea</b>	2.080 Palabras/línea	11.090 Palabras/línea
<b>Velocidad de datos</b>	41.600 bits/segundo (41,6 kB/s)	66.400 bits/segundo (665,4 kbps)
<b>Tamaño de pixel</b>	4 kilómetros	1,1 kilómetros
<b>Km<sup>2</sup>/pixel</b>	Superficie de 16 km <sup>2</sup> /pixel	Superficie de 1,21 km <sup>2</sup> /pixel

Fuente: Tabla propia de los autores, basado en [19] [27].

Dado que las imágenes HRPT se transmiten como una señal digital en las frecuencias de radio de 1.698 MHz, 1.707 MHz, se requiere equipos en la estación base para recibir la señal de radio, demodular la señal, y mostrarlo en un ordenador personal [19].

La banda de frecuencias de operación para HRPT es la Banda L en 1,670-1,710 GHz y los tipos de modulación digital son: Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria BPSK (*Binary Phase Shift keying*) y la Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura QPSK (*Quadrature Phase Shift keying*) [28]. En los satélites NOAA KLMNN<sup>3</sup> la potencia de transmisión es de 6,35 vatios o 38,03 dBm [29].

#### **2.3.4. Diferencias entre satélites de órbita polar y satélites geoestacionarios.**

En la figura 2.9 se pueden observar las diferencias entre los satélites de órbita baja y los satélites geoestacionarios. Cada una de estas órbitas proporcionan ventajas específicas. Por su parte los satélites de órbita polar proporcionan imágenes de toda la superficie de la Tierra, al menos, dos veces al día; sin embargo, el fotografiado de una sola franja por una sola órbita es limitada, estos datos no permiten un seguimiento continuo del desarrollo de los patrones climáticos, especialmente en las regiones

<sup>3</sup> K (NOAA 15), L (NOAA 16), M (NOAA 17), N (NOAA 18), N' (NOAA 19)

tropicales y templadas, por su parte, los satélites geoestacionarios proporcionan una cobertura continua de un lado de la Tierra que les permite rastrear los patrones climáticos regionales. Una desventaja de la órbita Geoestacionaria es que la resolución en la extremidad de la Tierra es limitada; lo que limita la cobertura en las regiones polares. También desde el satélite espacial solo se puede observar un lado de la Tierra [19].

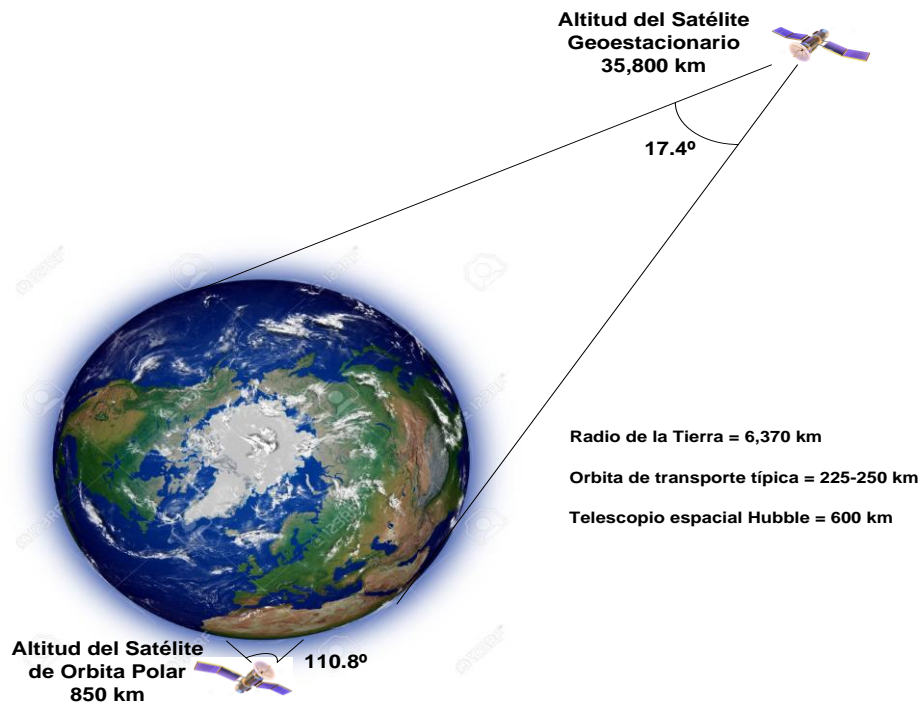


Figura 2.9.- Comparación de geometrías geoestacionaria y polar.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

Desde la altitud del satélite geoestacionaria solamente se abarca un ángulo de 17,4 grados. Un satélite meteorológico de órbita polar, a una altitud de unos 850 km., ve una porción relativamente pequeña del mundo en un momento dado [19].

## 2.4. Radio Definida por Software.

SDR (*Software Defined Radio*) es un sistema de radiocomunicaciones donde los distintos componentes que suelen ser implementados en *hardware* como: mezcladores, filtros, moduladores/demoduladores, etc.; son implementados en *software*, todo esto utilizando un computador [30].

En la figura 2.10 se muestra como está compuesto el esquema básico de un SDR, este cuenta con tres bloques funcionales: sección de RF, sección de IF (*Intermediate*

Frequency) y sección Banda Base. La parte de RF e IF se implementan en *hardware* mientras que la sección de Banda Base en *software* [31].

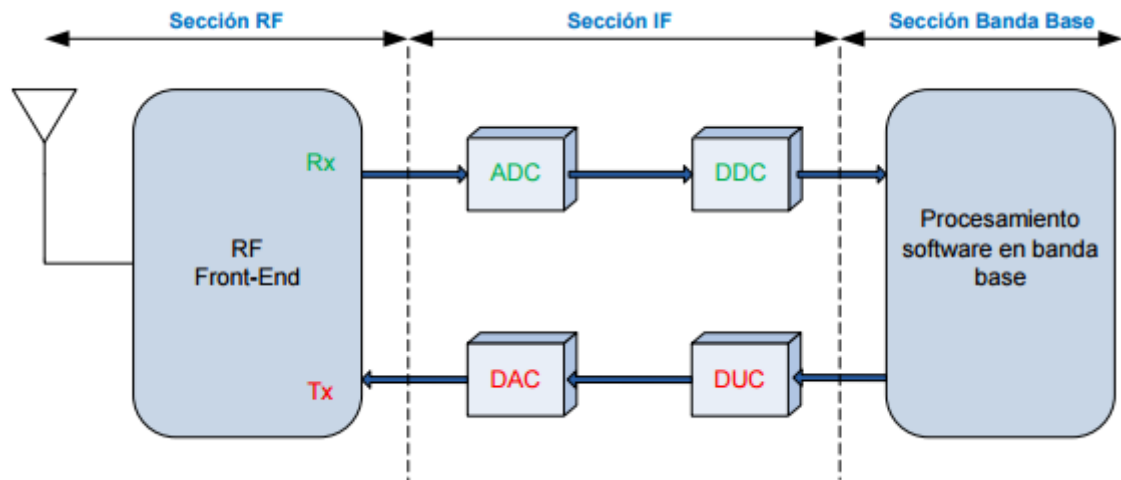


Figura 2.10.- Diagrama de bloques funcionales de SDR.  
Fuente: Tomado de [31].

### 2.4.1. Arquitectura de hardware SDR.

La arquitectura *software* consiste en un subsistema analógico y subsistema digital. Las funciones analógicas son restringidas a aquellas que no pueden ser mejoradas digitalmente, que incluyen: antena, filtrado RF, combinación RF, pre-amplificación en recepción y transmisión de potencia de amplificación. A continuación, en la figura 2.11 se muestran y se detallan las partes que conforman un *transceiver* de radio definido por *software*.

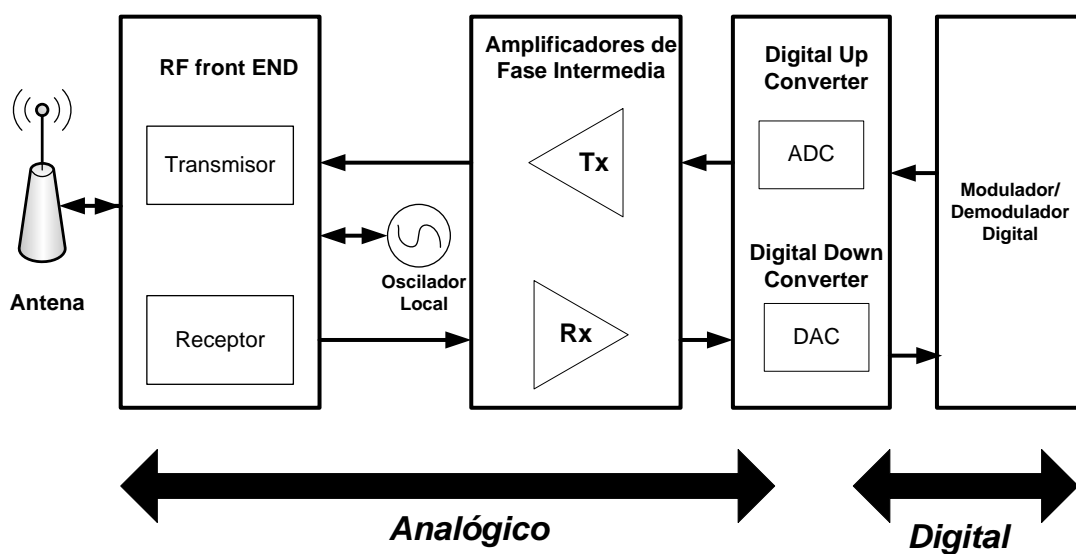


Figura 2.11.- Arquitectura *hardware* SDR.  
Fuente: Imagen propia de los autores, basado en [32].

## 2.5. Plataformas de hardware para SDR.

El *hardware* del SDR es el encargado de proporcionar toda la flexibilidad y permite reconfigurar el radio. Normalmente este *hardware* está conformado por dispositivos DSP, pero cada vez son más frecuentes las implementaciones que combinan DSP con FPGA y ASIC (Circuito Integrado de Aplicaciones Específicas), para el desarrollo de las diversas funciones que desempeña este subsistema, para las cuales cada tipo de dispositivo ofrece ventajas y desventajas significativas en su elección como plataforma *hardware* de implementación [33].

Para realizar el procesamiento de las señales basándose en *software* existen diversas alternativas diferenciadas principalmente por dos parámetros: consumo de potencia y costo de los equipos. Aunque el tamaño de los componentes también puede ser una variable importante a considerar en ciertas aplicaciones. Kenington [34] presenta algunos de los factores más determinantes en el costo de las alternativas *hardware* para SDR [33]:

- ✓ El costo directo de los dispositivos en sí mismos.
- ✓ El costo asociado a los componentes adicionales y complementarios.
- ✓ Costos relacionados con consumo de potencia, refrigeración y tecnologías de alimentación.
- ✓ Inversiones en herramientas y entrenamiento para el desarrollo.
- ✓ El ciclo de vida del producto SDR y sus diferencias con el ciclo de vida de las aplicaciones/servicios sobre él implementadas.
- ✓ Grado de flexibilidad requerido [33].

De esta manera, los actuales requerimientos de flexibilidad en el procesamiento multimodo y multibanda imponen serios retos a los esquemas de implementación física de SDR, y las cuatro alternativas para ello se resumen en la tabla 2.6 [33].

Tabla 2.7.- Comparación de alternativas para *hardware* SDR.




	<b>DSP de alta velocidad</b>	<b>Múltiples ASIC</b>	<b>Hardware Parametrizado</b>	<b>Lógica Reconfigurable (FPGA)</b>
<b>Consumo de Potencia</b>	Muy alta	Muy alta	Alta	Moderada
<b>Tamaño</b>	Moderado	Grande	Bajo	Bajo
<b>Costo</b>	Moderado	Alto	Moderado	Bajo
<b>Campo Actualizable</b>	Alto	Ninguno	Medio	Alto
<b>Evolución del chip</b>	Fácil	Difícil	Moderado	Fácil
<b>Herramientas</b>	Muchas	Muchas	Algunas	Algunas

Fuente: Tomada de [33].

En base a la investigación en la tabla 2.7 se presenta una breve descripción de las plataformas de *hardware* más utilizadas para SDR.

Tabla 2.8.- Plataformas de hardware SDR.

Plataforma	Características	
<p><b>SRL QuickSilver QS1R.</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Resolución de 16bits.</li> <li>✓ Conversor analógico/digital (ADC) de 130MSPS.</li> <li>✓ FPGA Altera EP3C25 <i>Cyclone</i> III.</li> <li>✓ Interfaz USB 2.0.</li> <li>✓ Frecuencias que van desde 10KHz a 62,5 MHz en configuración estándar y puede ser usado en aplicaciones hasta 500MHz [35].</li> </ul>	 <p>Fuente: Tomado de [35].</p>
<p><b>WR-G31DDC 'EXCALIBUR'.</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Dispositivo de alto rendimiento.</li> <li>✓ Muestreo directo.</li> <li>✓ Receptor de onda corta.</li> <li>✓ Rango de frecuencias que van desde 9KHz a 50MHz.</li> <li>✓ Analizador de espectros en tiempo real de 50 MHz.</li> <li>✓ 2MHz de ancho de banda instantáneo disponible para grabar, demodular y el posterior procesamiento digital [36].</li> </ul>	 <p>Fuente: Tomado de [36].</p>
<p><b>FiFi SDR</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Basado en el oscilador Si570.</li> <li>✓ Tarjeta de sonido integrada, USB, permite la recepción de todas las transmisiones y bandas de radioaficionados en onda media y corta en todos los tipos de modulación.</li> <li>✓ Dispositivo de audio USB con una velocidad de muestreo de 192KHz [37].</li> </ul>	 <p>Fuente: Tomado de [37].</p>
<p><b>BladeRF</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Frecuencias desde 300MHz hasta 3,8GHz, sin necesidad de tarjetas extras.</li> <li>✓ Soportan el <i>software</i> GNURadio.</li> <li>✓ Actúa como un modem de RF, una picocelda de GSM o LTE, receptor GPS, etc.</li> <li>✓ El <i>firmware</i> del microcontrolador USB 3.0 (Cypress FX3) está disponible para ser modificado.</li> <li>✓ Posee una velocidad de 5Gbps.</li> <li>✓ Baja latencia y mayor entrega de potencia por un sólo cable, permitiendo un gran ancho de banda para radio en las computadoras modernas [38].</li> </ul>	 <p>Fuente: Tomada de [38].</p>

<p><b>EasySDR</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Diseñado esencialmente para operar en computadores personales.</li> <li>✓ Este dispositivo se basa en un alto sintonizador multibanda RF.</li> <li>✓ Trabajando con entradas de frecuencia configurable entre 64MHz y 1.700MHz.</li> <li>✓ La señal amplificada deseada se obtiene por un amplificador de bajo ruido, sintonizado a frecuencia intermedia (IF) y luego muestreada a un ADC de 16bits con 48.000 muestras/segundo de frecuencia de muestreo.</li> <li>✓ Los datos son muestreados y enviados a la PC a través de la interfaz USB y pueden ser decodificados por el <i>software</i> HDSDR [39].</li> </ul>	 <p>Fuente: Tomada de [39].</p>
<p><b>HackRF</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Opera en el rango de frecuencias que van desde 30MHz hasta 6GHz.</li> <li>✓ Puede ser usado para transmitir o recibir señales de radio.</li> <li>✓ Opera en el modo <i>Half-duplex</i>.</li> <li>✓ El máximo ancho de banda es de 20MHz, alrededor de 10 veces el ancho de banda de sintonizadores <i>dungle</i> de TV que son populares para SDR.</li> <li>✓ Es lo suficientemente pequeño para llevarlo junto con el computador personal.</li> <li>✓ HackRF beta está siendo utilizado en las plataformas Linux, OSX y Windows [40].</li> </ul>	 <p>Fuente: Tomado de [40].</p>
<p><b>USRP N210</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Permite diseñar e implementar sistemas de radio de <i>software</i> flexible siendo ideal para aplicaciones que requieren alto rendimiento en RF y gran ancho de banda.</li> <li>✓ Estas aplicaciones incluyen prototipos de capa física, acceso dinámico de espectro y radio cognitiva, monitoreo del espectro, grabación, reproducción e incluso despliegue del dispositivo conectado a la red.</li> <li>✓ Se puede usar con GNURadio, LabVIEW™ y Simulink™.</li> <li>✓ Dual 100MS/s, 14-bit ADC.</li> <li>✓ Interfaz Gigabit Ethernet para conectar hacia la PC.</li> <li>✓ Spartan 3A-DSP 3400 FPGA [41].</li> </ul>	 <p>Fuente: Tomada de [41].</p>

Fuente: Tabla propia de los autores.



Las principales ventajas que ofrece el uso de SDR en este trabajo de titulación son las siguientes:

- ✓ SDR reemplaza mediante software los parámetros o componentes de hardware que están sujetos a alteraciones en su funcionamiento por cambios de temperatura, variaciones en la fabricación y el envejecimiento.
- ✓ Los productos de hardware son difíciles y costosos de mejorar y/o actualizar, y la actualización de estos implica el cambio de módulos, tableros, equipos, etc. Un SDR se puede mejorar mediante una actualización de software.
- ✓ SDR permite diseñar aplicaciones específicas, es decir, su funcionalidad y su interfaz puede ser rediseñada para adaptarse a cambios en los requisitos definidos por usuarios, mediante una modificación de software, sin la necesidad de reemplazar la plataforma de hardware.

**CAPÍTULO III**  
**MATERIALES Y MÉTODOS**

### 3.1. Estación terrena.

Para la obtención de imágenes provenientes de satélites meteorológicos, los elementos de una estación terrena convencional son los siguientes [19]:

1. Disco parabólico de 1,2 m o más.
2. Posicionador automático de antena con control tanto en azimut y elevación.
3. Amplificador de bajo ruido.
4. *Down-converter*.
5. Receptor de banda ancha.
6. Demodulador PLL
7. Tarjeta para sincronización de bits
8. Computador personal.
9. *Software* para procesamiento y decodificación de imagen.

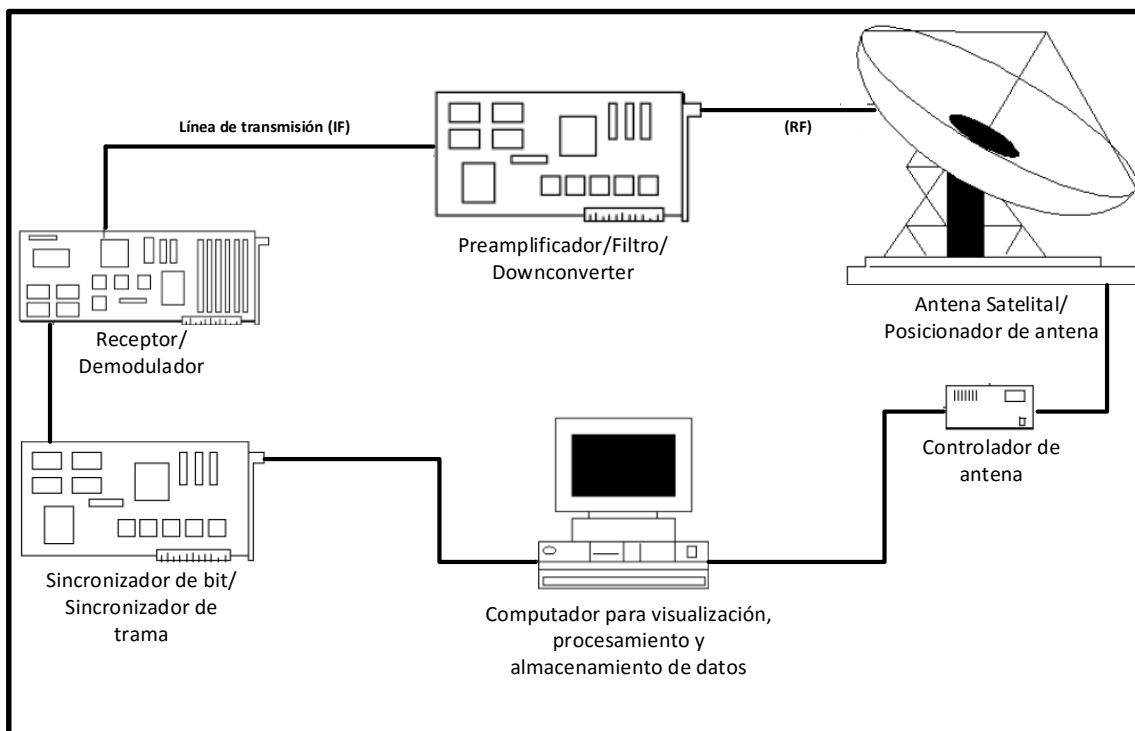


Figura 3.1.- Diagrama general de una estación terrena tradicional.  
Fuente: Imagen propia de los autores basado en [19].

La figura 3.1 muestra los componentes para la recepción de imágenes satelitales en alta resolución HRPT, y a continuación se detalla los más importantes.

- **Antena:** La señal digital HRPT se transmite en 1.698, 1.702 y 1.707 MHz. A estas frecuencias el seguimiento del satélite es esencial. La mayoría de los sistemas HRPT emplean una antena parabólica. Con una antena parabólica de 1,2 m se

proporciona una ganancia requerida (alrededor de 24 dB), mientras que todavía proporciona una plataforma manejable para el seguimiento.

- **Preamplificador de bajo ruido:** Este elemento es imprescindible para obtener imágenes HRPT de buena calidad. La figura de ruido LNA debe ser de 0,8 dB o menor. Esto corresponde a una temperatura de ruido de 59 grados Kelvin. La ganancia debe ser de al menos 30 dB.
- **Downconverter:** La señal digital HRPT en la frecuencia de 1.698 – 1.707 MHz a menudo se convierte en una señal más transportable en la gama de frecuencias VHF. Para esta conversión se utiliza un circuito *downconverter*. Las frecuencias de 128 MHz a 145 MHz se utilizan a menudo como la salida del *downconverter*.
- **Bits y trama de sincronización:** Se necesita un sincronizador de bits para extraer el reloj de datos. La sincronización de trama y de conmutación se utiliza para completar la extracción de los datos de telemetría y de la imagen.
- **Computador personal:** El ordenador personal tiene que tener capacidad como para manejar la velocidad de datos de 665 kbps y almacenamiento sustancial para los cientos de megabytes de datos AVHRR [19].

A continuación, se detalla la propuesta del sistema para la recepción de imágenes satelitales en alta resolución utilizando SDR.

1. Disco parabólico de 1,2 m o un arreglo de antenas helicoidales (con una ganancia superior a 23 dBi).
2. Posicionador automático de antena con control en azimut y elevación.
3. Amplificador de bajo ruido.
4. Downconverter.
5. USRP N210.
6. Computador personal

El diagrama del sistema propuesto se muestra en la figura 3.2 y cada uno de sus componentes se detalla en los siguientes apartados de este capítulo.

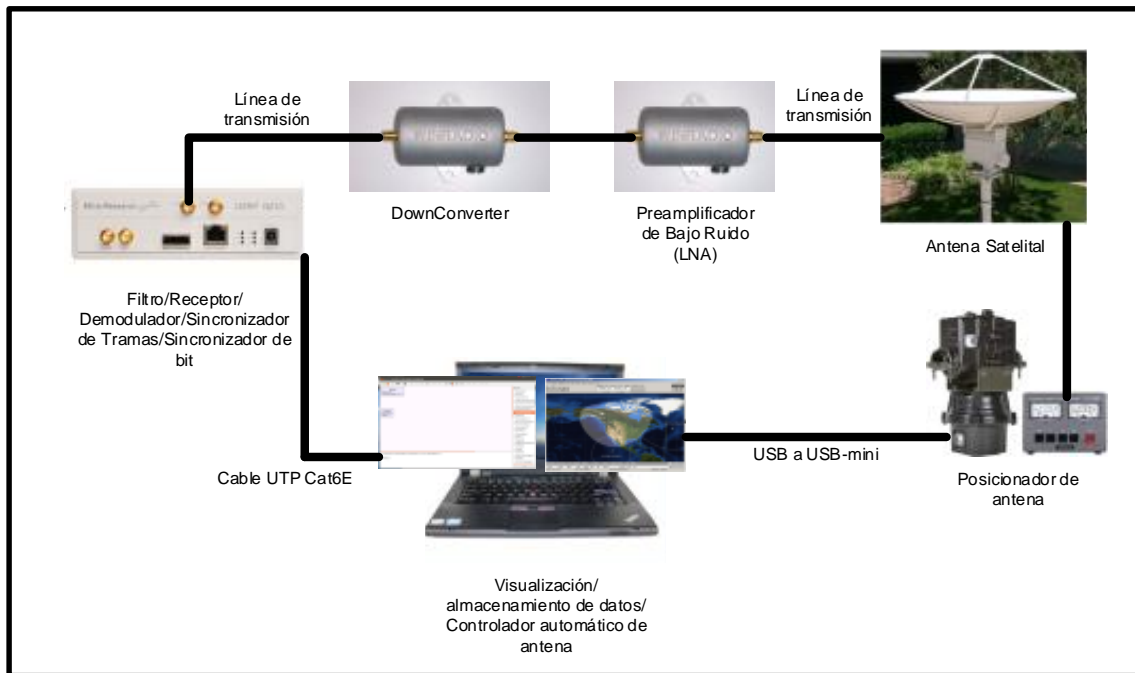


Figura 3.2.- Diagrama del sistema propuesto usando SDR.

Fuente: Imagen propia de los autores.

- **Antena:** En el apartado 3.3 se explica la antena elegida para la frecuencia central de 1.700MHz de la señal digital HRPT.
- **Preamplificador de bajo ruido:** Utilizado para amplificar la señal de baja potencia, este dispositivo contiene un preamplificador con una figura de ruido baja diseñado para funcionar en la gama de frecuencias de 30 a 3.500 MHz, teniendo en 1.700MHz una ganancia de 22dB [36].
- **Downconverter:** Este dispositivo contiene una alta estabilidad del oscilador local, un mezclador y filtros para convertir un rango de frecuencia de 1.700-3.500 MHz a un rango de frecuencia de salida desde 0 a 1.800 MHz [36].
- **Receptor/Demodulador/filtro:** USRPN210 es el dispositivo utilizado para recibir, filtrar y sincronizar y demodular la señal HRPT, en el apartado 3.5 y 3.6 se detallan este componente.
- **Posicionador de antena:** El Yaesu G-5500 ofrece un sistema completo de rotación azimut-elevación para antenas de medio y largo tamaño, ideal para aplicaciones de radioaficionados, en el apartado 3.2 a continuación se detallan el funcionamiento de este componente.

### 3.2. Sistema de seguimiento.

El sistema de seguimiento automático de los satélites, es indispensable, ya que el desplazamiento de los satélites de órbita polar es de 7,5 km/s. Para cumplir con este propósito se diseña e implementa un circuito de control para el rotor YAESU-G5500. El componente principal del circuito de control es un Arduino Nano que mediante un programa de control a través de comunicación serial obtiene la información de azimut y elevación del satélite desde el *software* y con esta información gira el rotor hacia la ubicación leída.

#### 3.2.1. Rotor YAESU-G5500.

El modelo de rotor utilizado para realizar el seguimiento automático de los satélites es el YAESU-G5500, como podemos observar en la figura 3.3 consta de dos partes, la estructura para el giro en azimut y elevación, y la unidad de control del rotor que es un componente de escritorio con medidores duales y controles de dirección de azimut de hasta 450°, y de elevación de 0° a 180°.



Figura 3.3.- Rotor YAESU-G5500 y su controlador.  
Fuente: Tomado de [42].

En la tabla, la 3.1. se detallan algunas de las especificaciones técnicas de este rotor.

Tabla 3.1.- Especificaciones técnicas Rotor YAESU-G5500.

<b>Voltaje requerido</b>	110-120 o 200-240 VAC
<b>Tensión del motor</b>	24 VCA
<b>Peso</b>	Rotor: 9 kg (20 libras) Controlador: 3 kg (6,6 libras)
<b>Tiempo de rotación</b>	Elevación (180°): 67 segundos Azimut (360°): 58 segundos.
<b>Torque de giro</b>	Elevación: 14 kg-m

	Azimut: 6 kg-m
<b>Torque de frenado</b>	Elevación y Azimut: 40 kg-m
<b>Carga vertical</b>	200 kg
<b>Exactitud</b>	± 4 %

Fuente: Tomado de [42].

### 3.2.1.1. Preparación y conexión.

Antes de instalar la antena en el rotor, se debe hacer correctamente todas las conexiones y comprobar la operación del rotor. Los pasos a seguir se describen en el manual de instrucciones del rotor YAESU-G5500 [42]. En la figura 3.4 se muestra el esquema de conexión entre el rotor y su controlador.

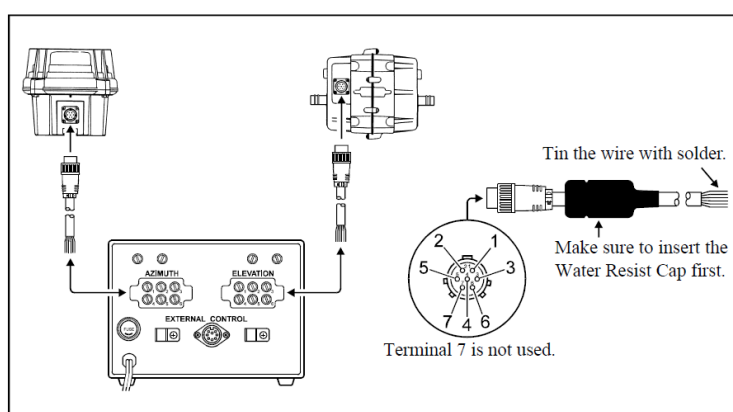


Figura 3.4.- Esquema de conexión entre el rotor y el controlador.  
Fuente: Tomado de [42].

Con la conexión que se muestra en la figura 3.4 se logra controlar el rotor de forma manual, esto se puede usar cuando se necesita orientar la antena hacia un punto fijo del espacio.

El inconveniente se presenta cuando se requiere orientar la antena montada en el rotor hacia un satélite de órbita polar. Para esto, es indispensable realizar un sistema de seguimiento automático que sea capaz de orientar la antena hacia el satélite.

### 3.2.1.2. Control externo.

El controlador del rotor YAESU tiene la opción de realizar un control externo. Para realizar el control automático externo, en la siguiente figura 3.5 se detalla cada uno de los pines disponibles y su función.

Pin	Function
6	Provides 2 to 4.5VDC corresponding to 0 to 450°
1	Provides 2 to 4.5VDC corresponding to 0 to 180°
4	Connect to Pin 8 to rotate left (counterclockwise)
2	Connect to Pin 8 to rotate right (clockwise)
5	Connect to Pin 8 to rotate UP
3	Connect to Pin 8 to rotate DOWN
7	Provides DC13V to 6V at up to 200mA
8	Common ground

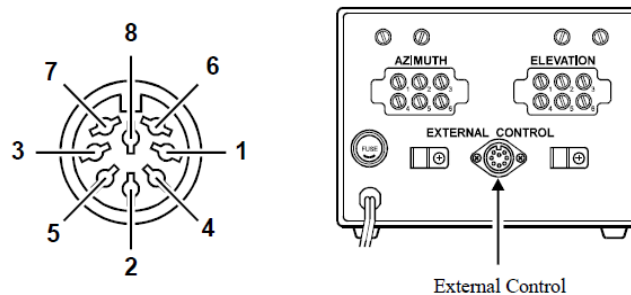


Figura 3.5.- Pines del DIN-8 para control externo.  
Fuente: Tomado de [42].

Para realizar el control remoto del rotor YAESU, se elabora un circuito que permita la comunicación del controlador del rotor con un software que indica las coordenadas de cada satélite, el elemento principal es un Arduino Nano.

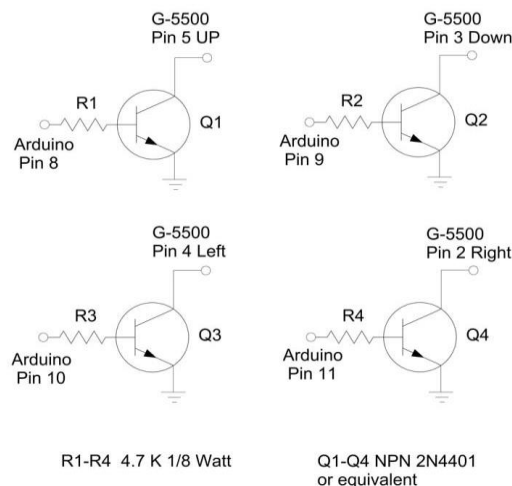


Figura 3.6.- Esquema básico para conexión entre Arduino y controlador.  
Fuente: Tomado de [43].

El esquema mostrado incluye cuatro transistores 2N4401 o equivalentes y cuatro resistencias de 4.7 kΩ. Al colector de cada transistor se conectan los pines: 2 (derecha),



3 (abajo), 4 (izquierda) y 5 (arriba) del controlador, tal como lo indican las figuras 3.5 y 3.6, la base de los transistores se conecta con los pines del Arduino nano mediante las resistencias indicadas.

Además, los pines 1 y 6 del DIN-8 se conectan a las entradas analógicas del Arduino nano. Estos pines proveen los niveles de voltaje (2 – 4,5 VDC) que determinan la ubicación en grados de elevación (0 – 180°) y azimut (0 – 450°) respectivamente.

### 3.2.2. Software de SatPC32.

SatPC32<sup>4</sup> es un programa multi-función que muestra la posición en tiempo real de cualquier satélite, ya sea, de órbita baja o de órbita geoestacionaria; con el *software* de SatPC32 se puede emitir comandos que controlan el sistema de posicionamiento (tanto en azimut 450° como en elevación 180°). También calcula la corrección por desplazamiento de frecuencia *Doppler*<sup>5</sup> para sintonizar a la frecuencia o canal adecuado para recibir claramente la señal que está siendo transmitida por el satélite.

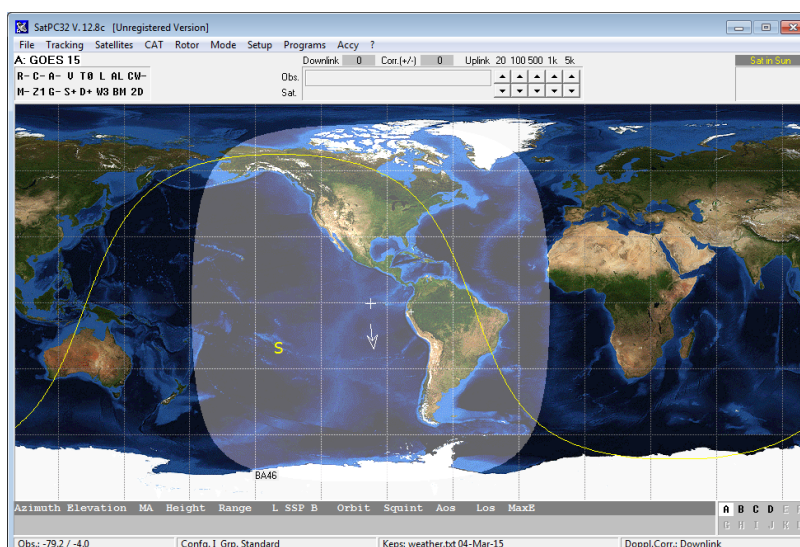


Figura 3.7.- Interfaz SatPC32.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

Como se puede observar en la figura 3.7 SatPC32 muestra las huellas de los pasos de los satélites seleccionados dentro de un mapa del mundo y muestra los resultados en texto debajo del mapa.

<sup>4</sup> <http://www.dk1tb.de/indexeng.htm>

<sup>5</sup> <http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Ondas/Ondas13.htm>

### 3.2.3. Arduino Nano.

Para la implementación del sistema de seguimiento automático se usa una placa de desarrollo denominada Arduino Nano que es una placa basada en el microcontrolador ATmega328. En la figura 3.8 se describe cada una de las funciones de esta placa [44].

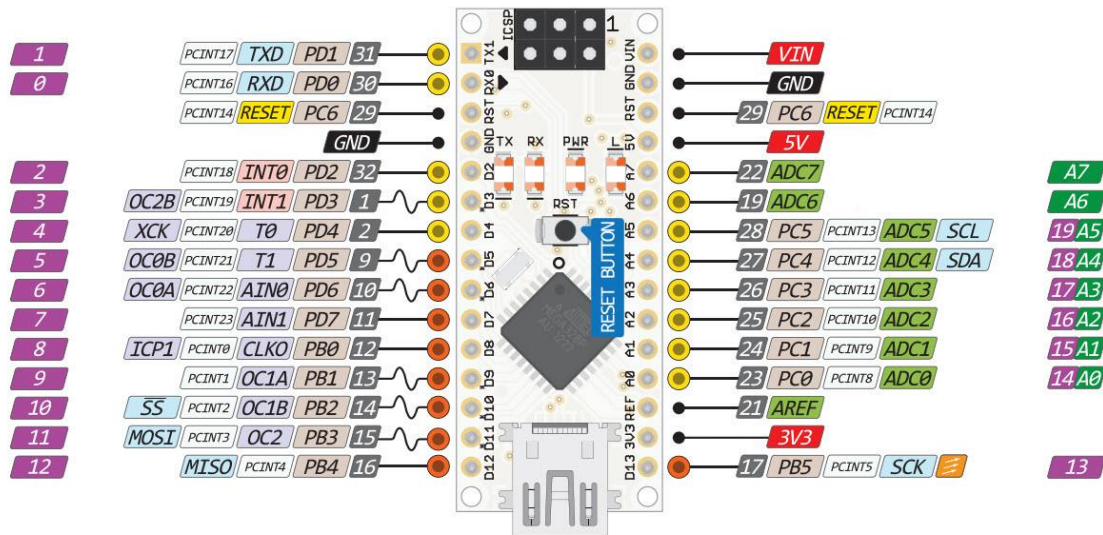


Figura 3.8.- Arduino Nano, *PinOut Diagram*.  
Fuente: Tomado de [45].

En este dispositivo se implementa el algoritmo para el control externo del rotor, dicho algoritmo debe lograr leer los niveles de voltaje de los pines 1 y 6 del controlador para determinar la ubicación actual del mismo, comparar esta ubicación con la indicada por el *software* SatPC32, y según sea el caso activar los pines D3, D5, D6 o D9 del Arduino que se conectan con los pines: 2 (derecha), 3 (abajo), 4 (izquierda) y 5 (arriba) del controlador para reubicar el rotor según la información de SatPC32. El código que permite el control del rotor se encuentra en el anexo D.

### 3.2.4. Circuito para el sistema de seguimiento automático.

Tal como se indica en la sección 3.2, es necesario hacer una placa de circuito impreso donde se ubique el Arduino nano que vamos a utilizar, se usa el circuito integrado ULN2803A<sup>6</sup> que hace las veces del esquema de resistencias y transistores mostrado en la figura 3.6, un conector RS-232 (DB-9) para la comunicación serial, y la interfaz I<sup>2</sup>C para conexión de una LCD serial que es utilizada para visualizar los valores de azimut y elevación hacia los cuales el rotor debe orientar la antena.

<sup>6</sup> <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2803a.pdf>

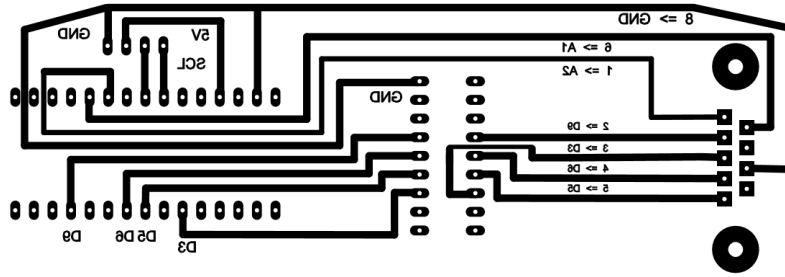


Figura 3.9.- Circuito realizado en PCB Wizard.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

En la figura 3.9 se indica el circuito impreso que se usa para el control externo del rotor YAESU-G5500. En la figura 3.10 se muestra la implementación del circuito con sus componentes dentro de una caja de plástico de 11x4 cm.



Figura 3.10.- Placa del controlador del rotor en su case.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

### 3.2.5. Pruebas del seguimiento automático de satélites.

El seguimiento automático de los satélites meteorológicos es un aspecto muy importante en este sistema, ya que estos orbitan la Tierra a una velocidad promedio de 7,5 km/s y hacer este seguimiento de forma manual carece de precisión. Para comprobar que el control externo del rotor YAESU está funcionando correctamente se realiza una comparación de los datos de azimut y elevación indicados por el *software* de seguimiento de satélites y los datos de ubicación del rotor mostrados en la LCD.

En la figura 3.11 se observa el diagrama polar del pase del satélite NOAA 19 el día 19/02/2016 sobre la ciudad de Loja y en la tabla 4.1(a) se muestra los datos obtenidos del *software* GPREDICT<sup>7</sup>, así como los datos de ubicación en azimut y elevación del rotor en la tabla 3.2(b), y la diferencia o error entre los dos en la tabla 3.2(c).

<sup>7</sup> <http://gpredict.oz9aec.net/>

Tabla 3.2.- Datos de Azimut y Elevación del satélite NOAA 19 con fecha 19/02/2016.

DATOS GPREDICT			SEGUIMIENTO AUTOMÁTICO		ERROR EN AZIMUTH	ERROR EN ELEVACIÓN
Hora	Azimut Satélite	Elevación Satélite	Azimut Rotor	Elevación Rotor		
14:40:41	167,1	0	170,1	0	3	0
14:41:28	166,97	2,97	169,7	5,6	2,73	2,63
14:42:16	166,85	6,28	165,5	9,9	1,35	3,62
14:43:03	166,71	10,06	169,3	13,6	2,59	3,54
14:43:51	166,56	14,51	162,6	16,5	3,96	1,99
14:44:38	166,38	19,94	162,7	21,1	3,68	1,16
14:45:26	166,14	26,86	163,1	29,8	3,04	2,94
14:46:13	165,78	34,18	167,7	31,1	1,92	3,08
14:47:01	165,1	48,94	166,1	51,3	1	2,36
14:47:48	163,17	66,82	165,2	69,2	2,03	2,38
14:48:36	95,55	88,28	97,5	88,9	1,95	0,62
14:49:23	351,02	67,76	354,2	70,2	3,18	2,44
14:50:11	348,98	49,59	352,8	46,5	3,82	3,09
14:50:58	348,31	36,52	351,3	33,2	2,99	3,32
14:51:46	347,98	27,13	349,9	29,3	1,92	2,17
14:52:33	347,79	20,12	349,1	17,2	1,31	2,92
14:53:21	347,68	14,62	348,8	12,3	1,12	2,32
14:54:08	347,61	10,12	347,7	9,4	0,09	0,72
14:54:56	347,57	6,31	346,7	4,3	0,87	2,01
14:55:43	347,55	2,98	344,5	1,7	3,05	1,28
14:56:31	347,55	0	344,4	0	3,15	0
					<b>±2,3°</b>	<b>±2,1°</b>

Fuente: Tabla propia de los autores.

(c)

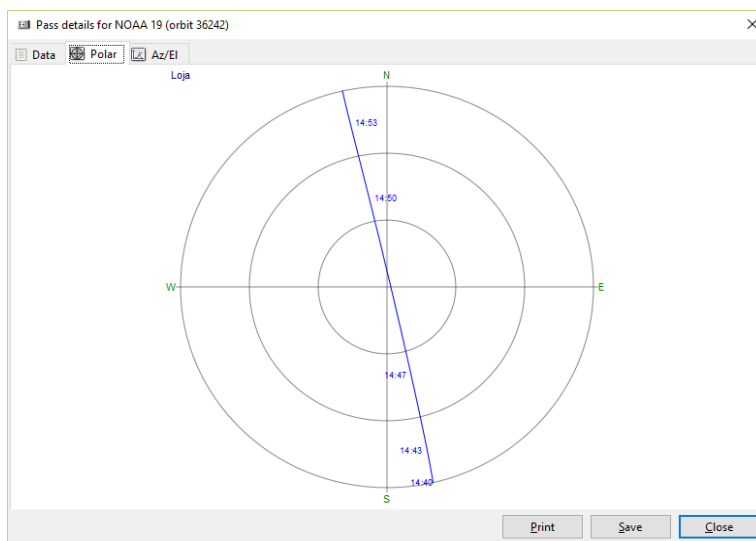


Figura 3.11.- Diagrama polar del pase. Satélite NOAA 19.

Fuente: Imagen propia de los autores.

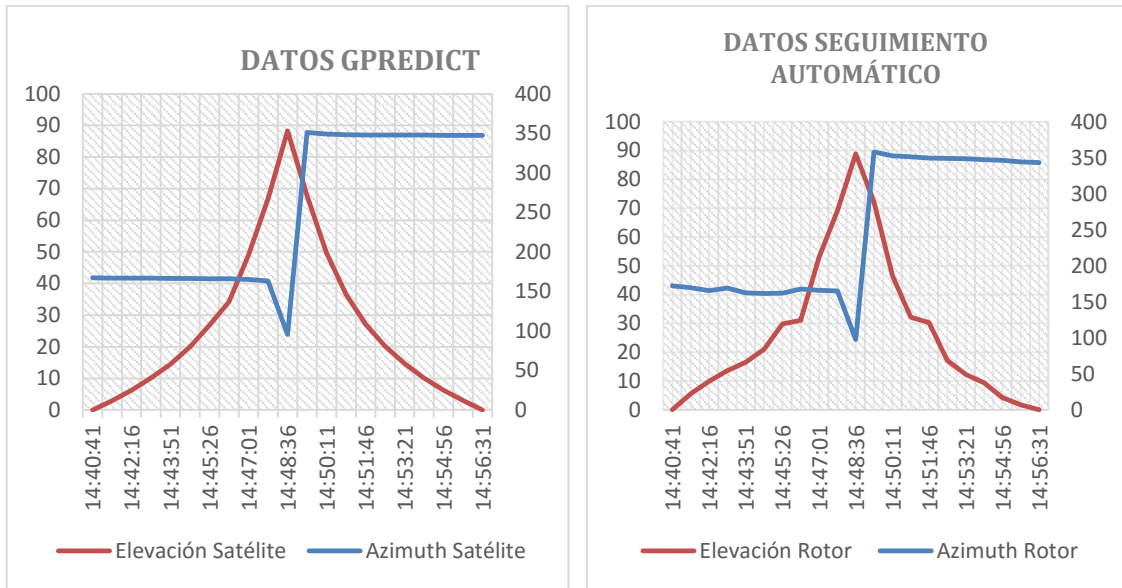


Figura 3.12.- Gráficas de Azimut y Elevación en función del tiempo.

Fuente: Imagen propia de los autores.

De los datos de la tabla 3.2, podemos deducir que el circuito para el control externo del rotor YAESU está funcionando correctamente, ya que, el error promedio tanto en azimut como elevación es aproximadamente  $\pm 2^\circ$ , lo cual en términos de porcentaje es menor a 1%. Recordamos que la información proporcionada por el fabricante especifica que tiene una precisión de  $\pm 4\%$ . Se puede constatar observando las figuras 3.12 y 3.13.

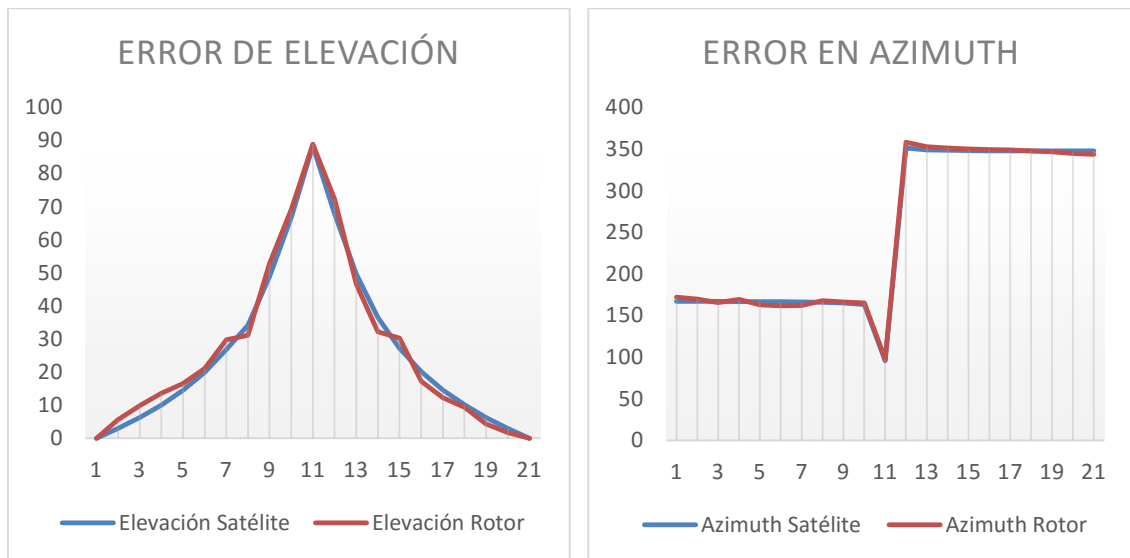


Figura 3.13.- Gráficas de Error en Azimut y Elevación

Fuente: Imagen propia de los autores.

En el Anexo G se muestra dos pruebas adicionales del sistema de seguimiento automático.



Figura 3.14.- Azimut y Elevación de Software y Controlador.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

En la figura 3.14, se muestra la información de elevación y azimut en el software SATPC32 (Az: 166,0 El: 31,4) y al mismo tiempo lo mostrado en la LCD del circuito de control externo (Az: 166,7 El: 31,1). Notamos que el error es  $0,7^\circ$  en azimut y  $0,3^\circ$  en elevación.

### 3.3. Sistema de recepción.

La parte de recepción en un sistema de comunicación que consiste en seleccionar, amplificar y demodular la señal deseada, separándola en lo posible del resto de las señales y del ruido que la acompaña [46].



Figura 3.15.- Esquema de un receptor.  
Fuente: Tomada de [46].

El satélite meteorológico emite su señal tanto en formato APT a una frecuencia de 137-138 MHz con un ancho de banda de 34 KHz; como en formato HRPT en la banda L (1,670-1,710 GHz) con un ancho de banda de 3,5 MHz. El satélite transmite una señal digital que puede ser captada por la estación receptora mientras este en línea de vista a la estación receptora [27].

En el sistema de recepción, un elemento clave para establecer la comunicación es la antena con la que se capta las señales emitidas por los satélites. En el ANEXO C, “Cálculo del enlace”, se determina que para el sistema en mención se requiere de una antena con ganancia superior a 23 dB. En el apartado 3.4, se realiza un estudio, diseño e implementación de tres tipos de antenas (Yagi, Helicoidal y Parabólica) para una frecuencia central de 1.700 MHz. Se optó por estas antenas según información recopilada de [19] [47] [48].

### 3.4. Antenas.

Las antenas para la recepción de las señales emitidas por los satélites son antenas que operan en la banda L, es decir, su frecuencia de operación está centrada en torno a los 1,7 GHz.

Son varios tipos de antenas que se pueden realizar para recibir dichas señales, a continuación, se detallan tres tipos de antenas especificando sus características de diseño y sus propiedades como ganancia y polarización. Al final se hace una comparativa entre los tres diseños y se selecciona la mejor opción para cumplir con el objetivo planteado.

#### 3.4.1. Antena Yagi.

La configuración mínima de este modelo de antena utiliza sólo tres elementos, al agregar un mayor número de componentes aumenta la ganancia. En teoría una antena Yagi de 6 elementos puede lograr una ganancia aproximada a los 12dB y con una antena de 22 elementos se podría lograr los 24 dB [49].

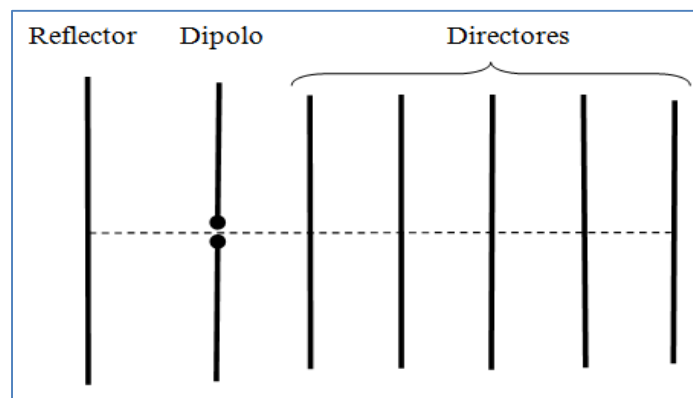


Figura 3.16.- Elementos de una antena Yagi.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

##### 3.4.1.1. Diseño de la antena Yagi.

Para el diseño de esta antena se tomaron como referencia tres diseños de diferentes fuentes, y luego de varias pruebas los mejores resultados en términos de ganancia se dieron con los parámetros de diseño descritos en la tabla 3.3, en donde las longitudes de los elementos son [50]:

Tabla 3.3.- Longitudes de los directores.

N° Directores	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ganancia [dB]	9	9.5	10	11	12	13.5	15	15.5	16
2° Director	n	n	n	n	m	m	m	m	m
3° Director		p	p	p	n	n	n	n	n
4° Director			q	q	p	n	n	n	n
5° Director				s	q	p	p	p	p
6° Director					s	q	p	p	p
7° Director						s	q	q	q
8° Director							s	q	q
9° Director								s	s
10° Director en adelante									s

Fuente: Tomado de [50].

En la tabla 3.4 se muestran los cálculos y las dimensiones de diseño para la implementación de la antena Yagi.

Tabla 3.4.- Dimensiones de la antena Yagi para 1,7 GHz.

Parámetro	Fórmula	Resultado
<i>Dipolo</i>	$\frac{\lambda}{2} = \frac{150}{f}$	8,82 cm
<i>Reflector</i>	$0.950 \frac{\lambda}{2} = \frac{142.4}{f}$	8,38 cm
<i>1er. Director</i>	$0.900 \frac{\lambda}{2} = \frac{135}{f}$	7,94 cm
<i>Director m</i>	$0.900 \frac{\lambda}{2} = \frac{135}{f}$	7,94 cm
<i>Director n</i>	$0.885 \frac{\lambda}{2} = \frac{133}{f}$	7,82 cm
<i>Director p</i>	$0.867 \frac{\lambda}{2} = \frac{130}{f}$	7,64 cm
<i>Director q</i>	$0.860 \frac{\lambda}{2} = \frac{129}{f}$	7,58 cm
<i>Directores s</i>	$0.837 \frac{\lambda}{2} = \frac{126}{f}$	7,41 cm



<i>Separación Dipolo-Reflector</i>	$0.18\lambda = \frac{54}{f}$	3,18 cm
<i>Separación Dipolo-1er. Director</i>	$0.10\lambda = \frac{27}{f}$	1,58 cm
<i>Separación Directores consecutivos</i>	$0.25\lambda = \frac{75}{f}$	4,41 cm

Fuente: Tabla propia de los autores.

Una vez definidas las dimensiones de los elementos el siguiente paso es proceder a la simulación mediante *software*.

### 3.4.1.2. Simulación de la antena Yagi.

Utilizando el *software* de simulación CADFEKO<sup>8</sup> procedemos a simular la antena diseñada anteriormente para conocer cuál sería la ganancia ideal de esta antena.

La ubicación en el plano del dipolo, el reflector y los veinte directores que dan un total de 22 elementos se muestra en la figura 3.17



Figura 3.17.- Antena Yagi simulada en CADFEKO

Fuente: Imagen propia de los autores.

Al visualizar la simulación en POSTFEKO (figura 3.18), la gráfica 3D del patrón de radiación nos indica que efectivamente se trata de una antena netamente directiva y que idealmente posee una ganancia de 16 dBi.

<sup>8</sup> [www.feko.info](http://www.feko.info)

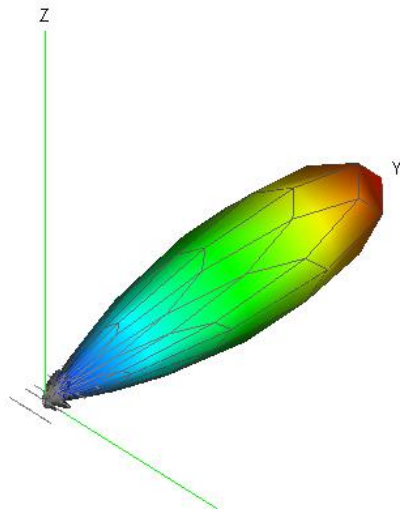


Figura 3.18.- Vista 3D del patrón de radiación de la antena Yagi.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

### 3.4.1.3. Implementación de la antena Yagi.

Con las dimensiones indicadas anteriormente en la tabla 3.4, se procede a implementar este primer diseño, el resultado se muestra en las figuras 3.19 (a) y (b) y se puede observar que son 22 los elementos que la conforman.

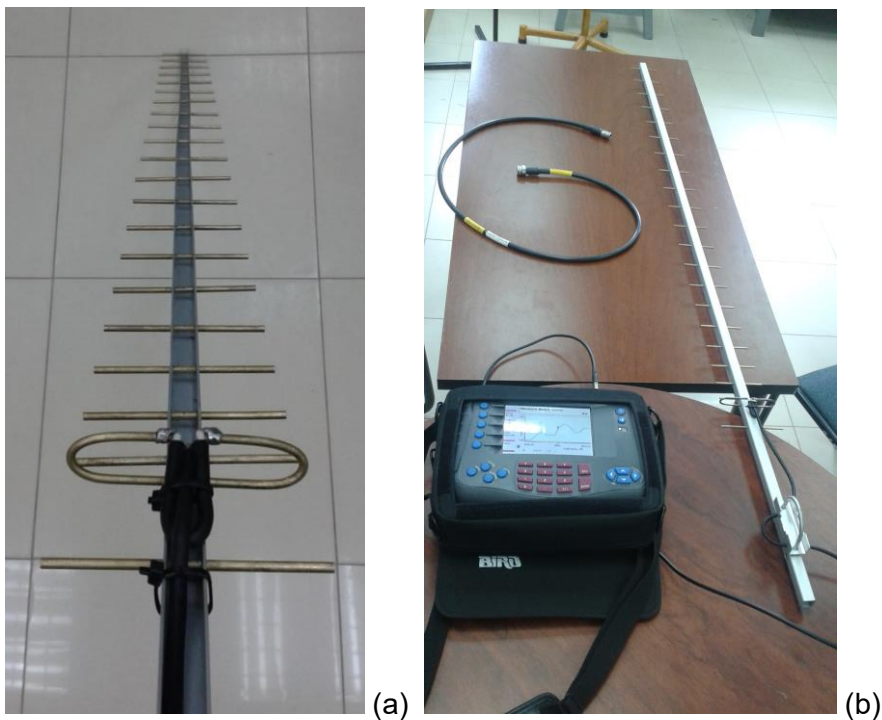


Figura 3.19.- (a) Antena Yagi de 22 elementos. (b) Medición de ROE.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

En la figura 3.19b, podemos observar la medición de la Relación de Onda Estacionaria (ROE) de esta antena. Este parámetro nos indica si la antena está correctamente

acoplada y resuena a la frecuencia para la cual ha sido diseñada, un ROE muy alto puede dañar los equipos a los cuales se conecta la antena, ya que, la energía sería reflejada hacia el equipo. Se considera que un ROE máximo de 1,5 es un límite de seguridad aceptable para equipos modernos. Un ROE de 1.0 es ideal por lo que debemos buscar obtener un valor lo más cercano a la unidad [51] [52].

El ROE obtenido es de 1.16, tal como se observa en la figura 3.20. Además, se realizaron pruebas de ganancia de esta antena respecto a un monopolo simple, con un procedimiento similar al explicado en el apartado **3.4.3.2** de este capítulo, y se obtuvo que la ganancia de esta antena es de 12 dB.

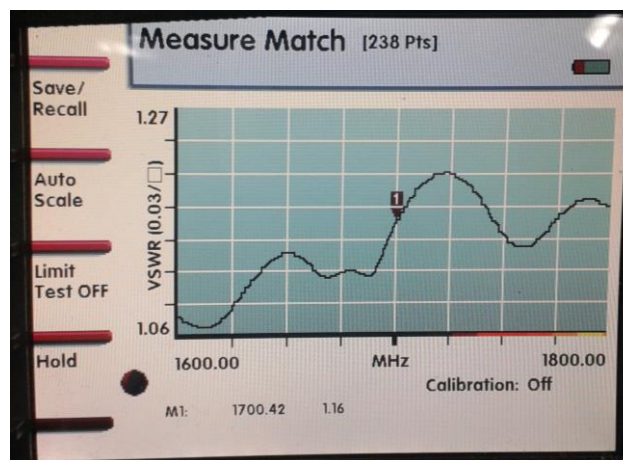


Figura 3.20.- ROE de la antena Yagi implementada.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

### 3.4.2. Antena helicoidal.

Las antenas de polarización circular son ampliamente utilizadas debido a las mejores características que éstas presentan frente a las antenas linealmente polarizadas. Dependiendo de las configuraciones que se realicen, estas antenas pueden presentar diferentes ganancias e impedancias, convirtiéndolas en antenas de alta fidelidad para las comunicaciones inalámbricas. Este tipo de antena es muy utilizada debido a su alta ganancia y directividad. Los modos de irradiación de una antena helicoidal son el modo normal y el modo axial. Entre las principales características de este tipo de antena se encuentran: polarización circular (mano derecha o mano izquierda), impedancia y ganancia sobre un rango de frecuencia de banda ancha [53].

#### 3.4.2.1. *Diseño de la antena helicoidal.*

La antena helicoidal consta de un ( $N$ ) número de espiras, espaciamiento ( $S$ ) entre espiras consecutivas, y diámetro ( $D$ ). La ecuación 3.1 se refiere a la circunferencia ( $C$ )

del cilindro imaginario cuya superficie pasa a través de la línea central del conductor helicoidal. La longitud total de la antena es ( $L$ ), que resulta de la multiplicación del número de espiras por la separación entre las mismas (Ecuación 3.2). La longitud total de la espira se calcula según la ecuación 3.3 y la longitud total del alambre con la ecuación 3.4 [51].

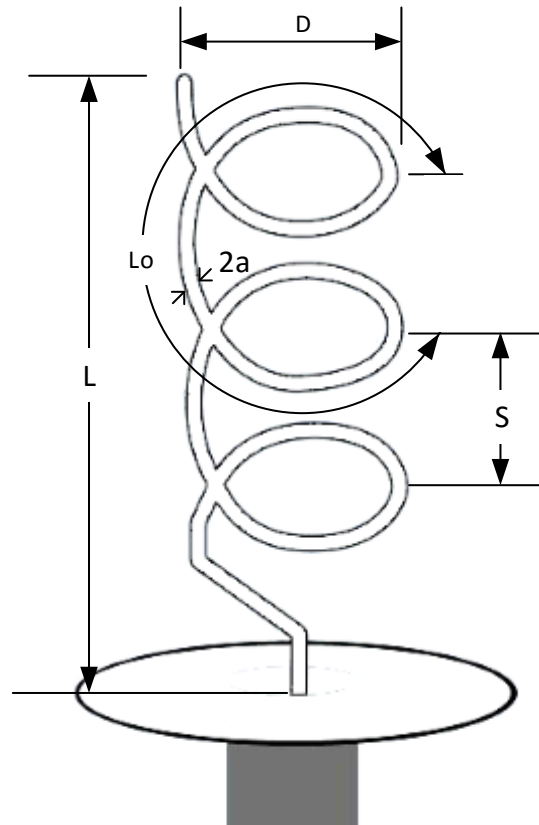


Figura 3.21.- Dimensiones de la antena helicoidal.  
Fuente: Propia de los autores basada en [51].

En donde:

$D =$  Diámetro de la espira

$S =$  Separación entre espiras consecutivas

$\alpha =$  Ángulo de inclinación

$N =$  Número de vueltas

$a =$  Radio del conductor

$C =$  Circunferencia de la hélice

$$C = \pi \cdot D \quad (3.1)$$

$L =$  Longitud total de la antena

$$L = N \cdot S \quad (3.2)$$

$L_0 =$  Longitud de la espira

$$L_0 = \sqrt{S^2 + C^2} \quad (3.3)$$

$L_n =$  Longitud total del alambre

$$L_n = N \cdot L_0 \quad (3.4)$$

Si una de las espiras fuera desenrollada la relación entre espaciamento ( $S$ ), circunferencia ( $C$ ), longitud de la espira ( $L_o$ ) y el ángulo de inclinación ( $\alpha$ ) será la que se muestra en la figura 3.22.

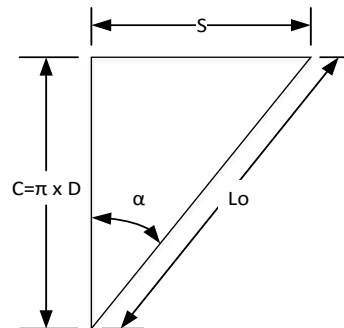


Figura 3.22.- Relación entre circunferencia, espaciamento longitud de la espira, y ángulo de inclinación de la hélice.  
Fuente: Tomada de [51].

Otro parámetro importante es el ángulo de separación ( $\alpha$ ) que es el ángulo formado por la línea tangente a la hélice del alambre y un plano perpendicular a un eje de la hélice. El ángulo de separación está dado por la ecuación 3.5 [51]:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{S}{\pi \cdot D} \right) = \tan^{-1} \frac{S}{C} \quad (3.5)$$

En la tabla 3.5 se muestran las dimensiones físicas de la antena helicoidal.

Tabla 3.5.- Dimensiones recomendadas de antena helicoidal.

<i>Espaciamento entre espiras</i>	$\lambda/4$
<i>Radio del plato reflector</i>	$0.8\lambda$
<i>Radio de las espiras</i>	$\lambda/6$
<i>Número de espiras</i>	25

Fuente: Tomada de [53].

### 3.4.2.2. Cálculos de la antena helicoidal.

Para el diseño de la antena, se ha considerado la frecuencia central para los satélites meteorológicos en HRPT que es de 1.700 MHz. Partiendo de esta frecuencia y según la tabla 3.5 en donde se muestran las dimensiones recomendadas, se procede con el diseño de la antena:

Tabla 3.6.- Cálculos para diseño antena helicoidal.

Parámetro	Fórmula	Resultado
Longitud de onda	$\lambda = \frac{c}{f}$	$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{1700 \times 10^6} = 0,1764 \text{ m}$
Espacio entre Espiras (S)	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{\lambda}{4} = \frac{0,1764}{4} = 0,0441 \text{ m}$
Radio del plato reflector	$0.8\lambda$	$0.8\lambda = (0.8)(0,1764) = 0,1411 \text{ m}$
Diámetro de las espiras (D)	$\frac{\lambda}{6} \times 2$	$\frac{\lambda}{6} \times 2 = \frac{0,1764}{6} \times 2 = 0,0588 \text{ m}$
Circunferencia de la hélice (C)	$C = \pi D$	$C = \pi D = \pi (0,0588) = 0,1847 \text{ m}$
Longitud de cada espira ( $L_o$ )	$L_o = \sqrt{S^2 + C^2}$	$L_o = \sqrt{S^2 + C^2} = \sqrt{0,0441^2 + 0,1847^2} = 0,18989 \text{ m}$
Longitud de la antena (L)	$L = N \times S$	$L = N \times S = 25 \times 0,0441 = 1,10 \text{ m}$
Longitud Total del alambre ( $L_n$ )	$L_n = N L_o$	$L_n = N L_o = (25)(0,1898) = 4,745 \text{ m}$

Fuente: Tabla propia de los autores.

En la tabla 3.7 se resumen los cálculos hechos para el diseño de la antena helicoidal.

Tabla 3.7.- Dimensiones físicas de la antena Helicoidal

Parámetro	Valor	Unidad
Espacio entre Espiras (S)	4,41	cm
Radio del plato reflector	14,11	cm
Diámetro de las espiras (D)	5,88	cm
Circunferencia de la hélice (C)	18,47	cm
Longitud de cada espira ( $L_o$ )	18,98	cm
Numero de vueltas (N)	25	-
Longitud de la antena (L)	1,10	m
Longitud Total del alambre ( $L_n$ )	4,75	m

Fuente: Tabla propia de los autores.

Con ayuda de la tabla anterior y con la ecuación 3.6 [52]; se puede encontrar la directividad con la que debe contar nuestra antena, para una frecuencia de 1.700 MHz entonces se tiene:

$$D_o = 5 \left( \frac{C}{\lambda} \right)^2 \frac{NS}{\lambda} = 5 \times N \frac{C^2 S}{\lambda^3} \quad (3.6)$$

$$D_o = 5 \times 25 \frac{(0,1847)^2 (0,0441)}{0,1764^3} = 34,25$$

### 3.4.2.3. Impedancia y acople de la antena helicoidal.

La impedancia característica de una antena helicoidal es del orden de los 140  $\Omega$  a 150 $\Omega$ , de manera general, los equipos vienen normalizados a una impedancia estándar de 50  $\Omega$ , por lo que se vuelve imperativo el realizar un sistema de acoplamiento capaz de reducir en un factor de 3 veces la impedancia característica de la antena helicoidal [53].

#### 3.4.2.3.1. Impedancia de una antena helicoidal.

La impedancia de la antena helicoidal viene dada por la siguiente ecuación:

$$R = 140 \left( \frac{C}{\lambda} \right) \quad (3.7) [54]$$

En donde:

$C =$  Circunferencia (m)

$\lambda =$  Longitud de onda (m)

Por lo tanto, considerando los parámetros de diseño vistos anteriormente, se tiene que la longitud de onda para la frecuencia de 1.700 MHz es de 0,1764 m, y el diámetro de las espiras de la hélice (D) es de 0,0588 m, la circunferencia de a hélice (C) es de 0,1847 m, entonces utilizando la ecuación 3.7 la impedancia de la antena sería:

$$R = 140 \left( \frac{0,1847}{0,1764} \right) = 146,58 \Omega$$

A consecuencia de que se trabaja en el modo axial de radiación, la impedancia de esta antena helicoidal tiende a ser puramente resistiva debido a que la onda se propaga sobre la misma antena [55].

#### 3.4.2.3.2. Acople de la antena helicoidal.

Según lo visto en el apartado anterior, es necesario reducir la impedancia de la antena helicoidal, del valor de 146,68  $\Omega$  se debe reducir hasta un valor próximo a los 50  $\Omega$ . El modelo de acoplador que se utiliza es el de  $\lambda/4$ , debido a que su diseño físico es fácilmente adaptable a la estructura de la antena [53].

Un acoplador de un cuarto de longitud de onda está conformado por una línea de transmisión que mide eso precisamente; es decir, dos conductores que configurados a una longitud de

$\lambda/4$  den a su salida una impedancia de 50  $\Omega$ , recibiendo a su entrada una impedancia de 146,68  $\Omega$ . Para este modelo de acoplador se cumple la relación siguiente [54]

$$R_A = \sqrt{R_{in} \times R_{out}} \quad (3.8)$$

Donde:

$R_A =$  Impedancia del acoplador

$R_{in} =$  Impedancia de entrada del acoplador

$R_{out} =$  Impedancia de salida del acoplador

Entonces con esto se tiene:

$$R_A = \sqrt{(146,68)(50)} = 85,63 \Omega$$

En consecuencia, se requiere tener un acoplador de  $\lambda/4$  cuya impedancia sea igual a 85,63  $\Omega$ .

El acople consiste en una lámina de cobre de un largo igual a un cuarto de longitud de onda que sigue el contorno de la espira de la hélice. Con objeto de poder relacionar las dimensiones físicas de la lámina de cobre del acople (longitud, ancho y espesor) con la impedancia característica que debe tener el acoplador (85.63  $\Omega$ ), se utiliza la relación de *Nurmann* para la impedancia de una lámina conductora sobre un plato reflector [56]:

$$R_A = \frac{70}{\sqrt{\epsilon}} \left( \frac{6D}{0,8b + d} + \frac{0,075b}{D} \right) \quad (3.9)$$

Dónde:

$D =$  Separacion entre el plato reflector y la lámina de acople.

$d =$  Espesor de la lámina de acole.

$b =$  Ancho del acople

$\epsilon =$  Constante de permitividad eléctrica

La impedancia  $R_A$  tiene que ser 85,63  $\Omega$ , y se definen parámetros como la separación entre el plato reflector y el acople  $D=0,5$  cm, y el espesor de la lámina de cobre disponible es de 1mm. Despejamos entonces la variable "b" y se obtiene que el ancho de la lámina de acople es de 1,03 cm. Estos datos se resumen en la tabla 3.8



Tabla 3.8.- Parámetros de diseño del acoplador.

Parámetro	Valor	Unidad
Longitud del acoplador ( $\lambda/4$ )	4,40	cm
Separación reflector-acople ( $h$ )	0,50	cm
Espesor de lámina de acople ( $d$ )	0,10	cm
Ancho de lámina de acople	1,03	cm

Fuente: Tabla propia de los autores.

#### 3.4.2.4. Simulación de la antena helicoidal.

Para la simulación de la antena helicoidal se ha utilizado el *software* de CADFEKO utilizando las dimensiones indicadas en la tabla 3.7.

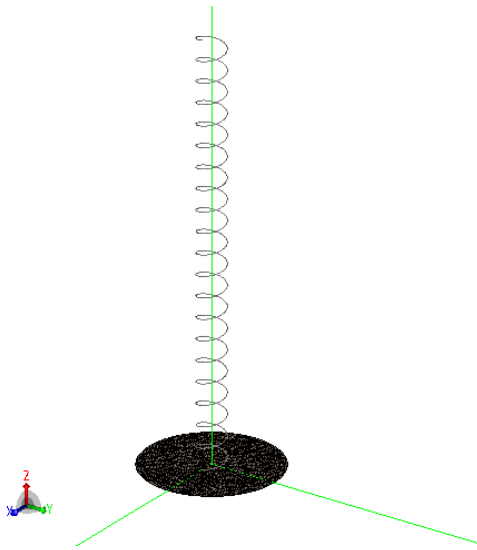


Figura 3.23.- Simulación de la antena helicoidal en CADFEKO.

Fuente: Imagen propia de los autores.

En la figura 3.23 se puede observar el modelo de la antena helicoidal en 3D, en la cual se denota las hélices con el plato reflector.

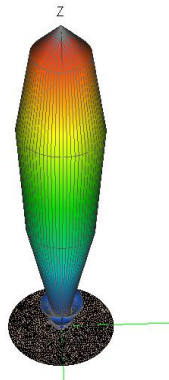


Figura 3.24.- Vista 3D del patrón de radiación de la antena Helicoidal.

Fuente: Imagen propia de los autores.

En la figura 3.24 se muestra la simulación realizada en el *software* de FEKO de la antena helicoidal, con la cual se obtiene una ganancia de 17 dBi.

El siguiente paso es comprobar experimentalmente cual es la ganancia de la antena implementada, y utilizando los equipos marca KEYSIGHT se obtuvo una ganancia de 13 dB respecto al monopolo vertical.

### 3.4.2.5. Implementación de la antena helicoidal.

Para la implementación de la antena helicoidal se parte los cálculos hechos para cada uno de los parámetros de la antena (ver tabla 3.7).



Figura 3.25.- Antena helicoidal implementada para 1,7 GHz.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

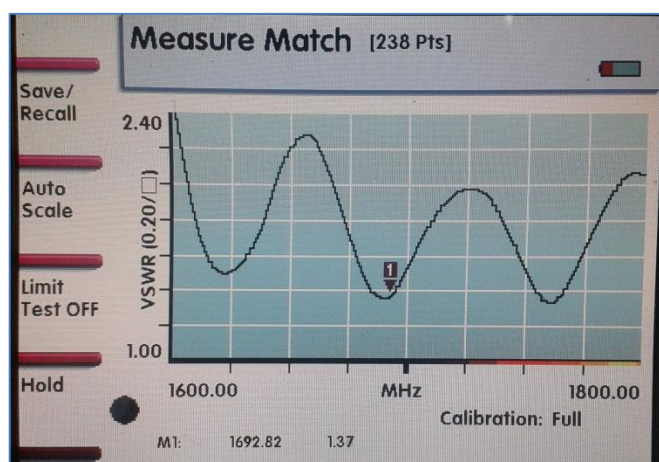


Figura 3.26.- Medición del ROE de la antena Helicoidal.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

En la figura 3.26 se observa la medición del ROE, el mismo que a la frecuencia de 1.692 MHz es igual a 1,37, por lo que la antena implementada puede ser usada para recepción.

### 3.4.3. Antena parabólica.

Son aquellas antenas que se caracterizan por llevar un disco reflector parabólico, estas generalmente son las más utilizadas para comunicaciones satelitales. Las principales características de este tipo de antenas son las siguientes [57]:

- Foco: Los reflectores parabólicos dirigen y concentran la energía capturada hacia un punto llamado foco, cuya ubicación depende de la forma de la parábola. El punto focal es de suma importancia, ya que, ese será el mejor lugar para colocar el alimentador. Cualquier desviación, con respecto al punto focal, en que ubiquemos nuestro alimentador producirá pérdidas, afectando la eficiencia de la antena.
- Tipo: Dentro de los reflectores parabólicos más frecuentes de conseguir están aquellos en que el eje esta descentrado y por ende el foco, llamadas *OFFSET* o de foco desplazado, y aquellos cuyo foco se ubica en el eje de la parábola, llamadas de Foco Primario o centrado.
- Eficiencia: Por las razones explicadas, entre otras, la eficiencia de una antena con reflector parabólico no alcanza el 100%, es decir que la energía que es capaz de capturar o generar no es igual al total de la energía disponible.
- Ganancia: La ganancia de estas antenas tiene relación con su diámetro, longitud de onda de la frecuencia de operación y su eficiencia, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$G \approx \Pi \left( \pi x \frac{D}{\lambda} \right)^2 \quad (3.10) [57]$$

Dónde:

$G$  = Ganancia de potencia.

$\Pi$  = Eficiencia

$D$  = Diámetro de la parábola.

$\lambda$  = longitud de onda.

Para aplicar la ecuación 3.10 hay que tomar en cuenta que el diámetro y la longitud de onda deben estar en la misma unidad de medida y se estima una eficiencia del 60%.

$$G \approx 0,6 \left( \pi x \frac{60}{17,64} \right)^2 = 68,51$$

La ecuación 3.10 nos da como resultado una ganancia en potencia de 68,51. Si transformamos esto a dB tenemos una ganancia de 18,4 dB.

### 3.4.3.1. Simulación de la antena parabólica.

Para la simulación de la antena se utiliza un disco parabólico de 60 cm de diámetro y 10 cm de profundidad, la simulación de este tipo de antena con dichas dimensiones se muestra a continuación en la figura 3.27.

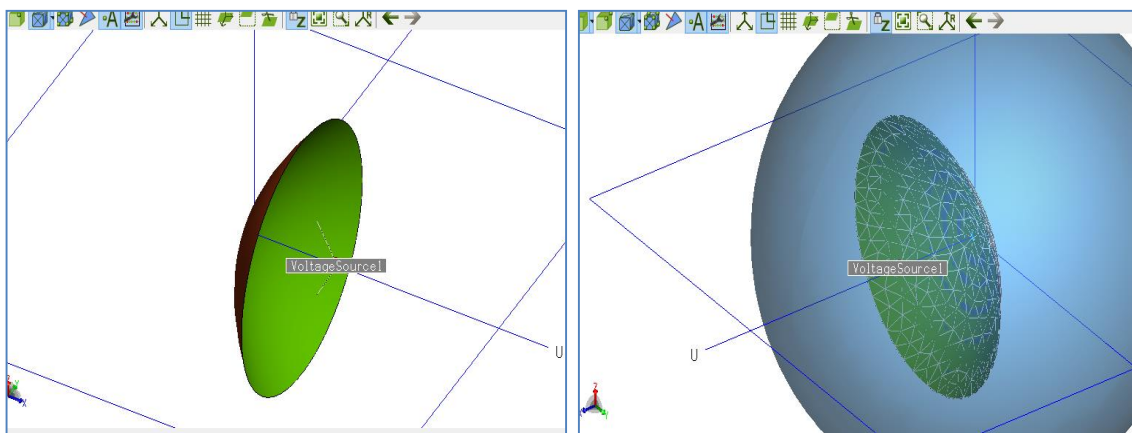


Figura 3.27.- Simulación del disco parabólico en CADFEKO.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

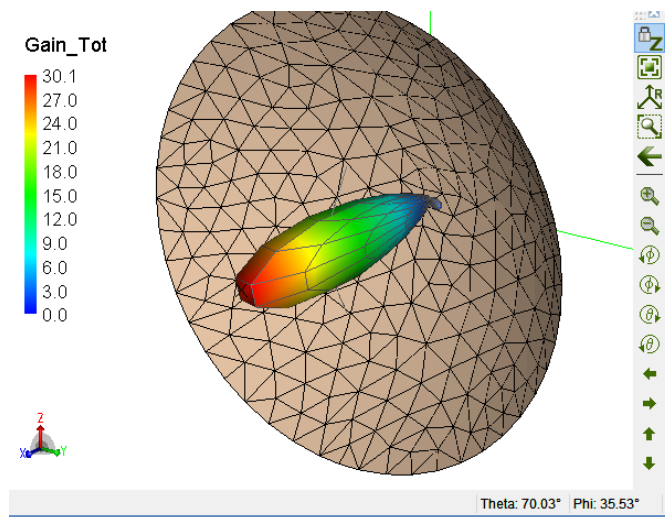


Figura 3.28.- Diagrama de Radiación y ganancia del disco parabólico.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

Como se puede observar en la figura 3.28 la ganancia en simulación de este reflector es de 30 dB, pero en la práctica dicho valor es menor ya que en la simulación se consideran elementos ideales.

La antena implementada se muestra a continuación:



Figura 3.29.- Antena parabólica con alimentador helicoidal.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

La antena mostrada en la figura 3.29 es el resultado de adaptar un alimentador tipo antena helicoidal de 3 espiras, de una ganancia aproximada de 5 dB, en un plato reflector parabólico de 60 cm de diámetro.

### **3.4.3.2. Ganancia de la antena parabólica.**

Para determinar la ganancia real de esta antena se realizó las pruebas de ganancia respecto a un monopolo simple en el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL).

Con el generador de señales marca KEYSIGHT disponible en el laboratorio, se emite una señal a la frecuencia deseada de 1,7 GHz y con el analizador de espectros observamos el nivel de señal receptado por la antena monopolo, tal como se indica en la siguiente figura 3.30:

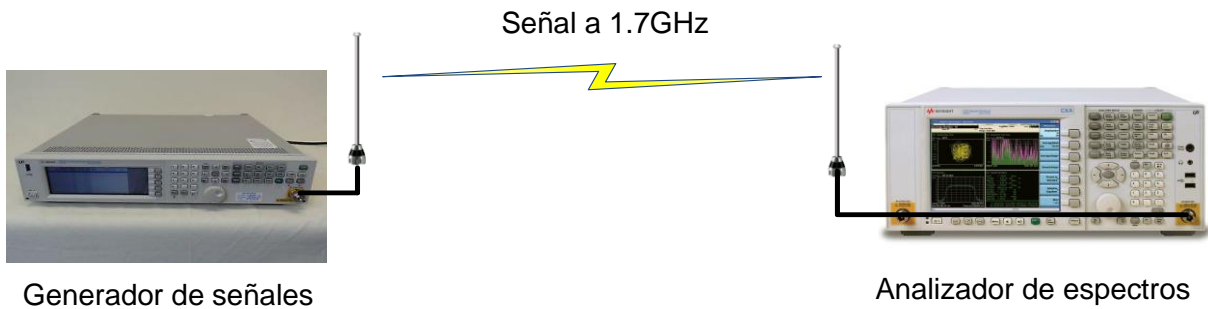


Figura 3.30.- Generador de señales y analizador de espectros marca KEYSIGHT.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

Con esta antena la señal se visualiza a -62 dBm y será el valor referencial para ser comparado con lo obtenido con la antena parabólica.

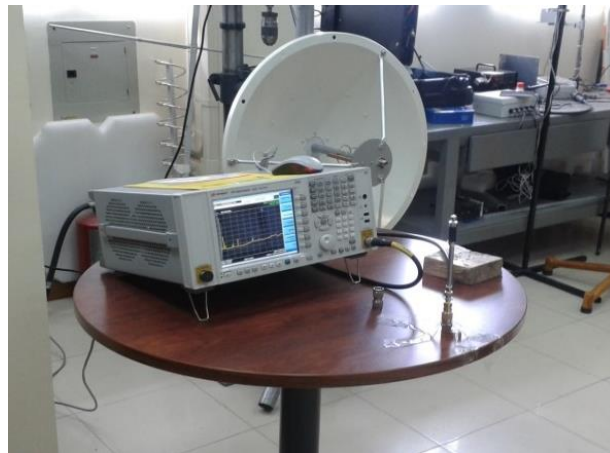


Figura 3.31.- Recepción de señal con antena monopolo.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

Al conectar la antena parabólica y nuevamente emitir una señal de iguales características a la anterior, podemos visualizar en el analizador de espectros la señal a -45 dBm (figura 3.32b) que comparados con los -62 dBm (figura 3.32a) se puede determinar que la ganancia real de nuestra antena es de 17dBm.

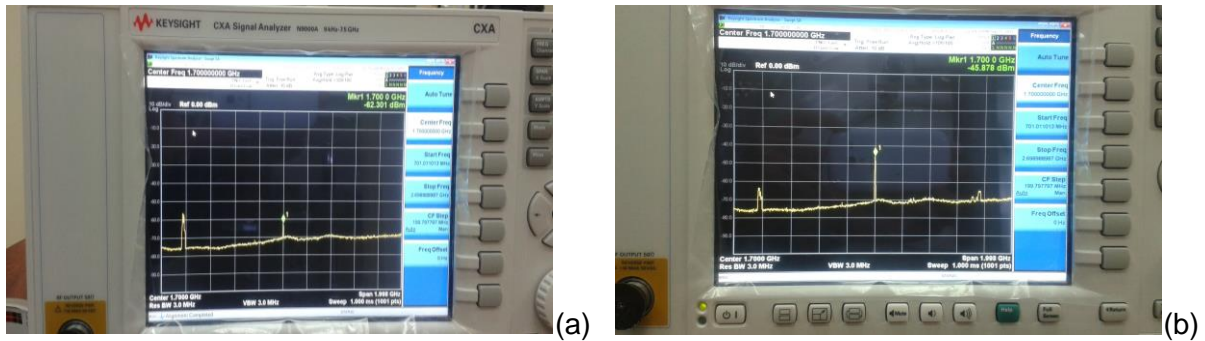


Figura 3.32.- Comparación de señales visualizadas en el analizador de espectros.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

### 3.4.4. Comparación de las antenas.

A manera de resumen en la tabla 3.9, se indica los valores de ganancia tanto teóricos, simulados e implementados de las tres antenas mostradas anteriormente.

Tabla 3.9.- Ganancia de las antenas implementadas.

Antena	Ganancia Teórica	Ganancia en simulación	Ganancia real (pruebas en laboratorio)
<i>Yagi de 22 elementos</i>	>16 dB	16 dB	11 dBm
<i>Helicoidal de 25 espiras</i>	15 dB	17 dB	13 dBm
<i>Parabólica de 60 cm de diámetro</i>	18,4 dB	30 dB	17 dBm

Fuente: Tabla propia de los autores.

De la tabla 3.9 podemos concluir que efectivamente la ganancia real es menor que la obtenida mediante fórmulas y simulaciones tomando en cuenta que en esos casos todo es “ideal” y no se consideran varios factores que en la implementación afectan a la eficiencia y por ende la ganancia de las antenas.

En base a los resultados, la antena seleccionada para realizar las primeras pruebas de recepción de señal de los satélites meteorológicos es la antena parabólica con alimentador helicoidal. Además, dado que los satélites NOAA transmiten sus señales digitales HRPT utilizando polarización RHCP, es necesario que el sistema de radiación satisfaga a este tipo de polarización.

Con lo mencionado, descartamos la antena Yagi que solo tiene 11 dBm de ganancia y polarización lineal (horizontal o vertical). Y además es necesario hacer mejoras a los dos diseños restantes para que puedan ser utilizados en la recepción de las señales. Dichas mejoras se explican a continuación en la sección 3.4.5.

### 3.4.5. Mejoras en las antenas para la recepción.

Lo que se propone en el caso de la antena helicoidal es realizar un arreglo de 4 antenas de similares características en una disposición de 2x2 (figura 3.33). De esta manera se logra un aumento de la eficiencia en el lóbulo de radiación gracias a la contribución individual de cada antena al patrón de radiación del arreglo, mejorando notablemente la relación adelante-atrás, con lo que el patrón de radiación se vuelve más directivo y por ende se obtiene una mejor ganancia. Teóricamente se logra incrementar en 3 dB la ganancia del arreglo por cada antena que se suma al sistema y aunque no existe limitación del número de antenas se recomienda un arreglo de 2x2 debido a limitaciones del orden físico [51] [53].

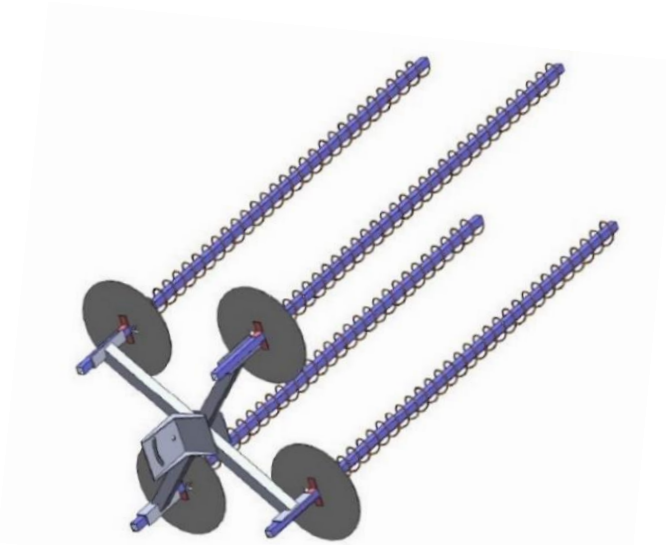


Figura 3.33.- Arreglo de antenas helicoidales.  
Fuente: Tomado de [53].

Para la simulación en CADFEKO ( Figura 3.34), se procede de manera similar a lo explicado en la sección “*Simulación de la antena helicoidal* 3.4.2.4.” La separación entre las antenas que conforman el arreglo es de  $2.6 \text{ veces } \lambda$  [53].



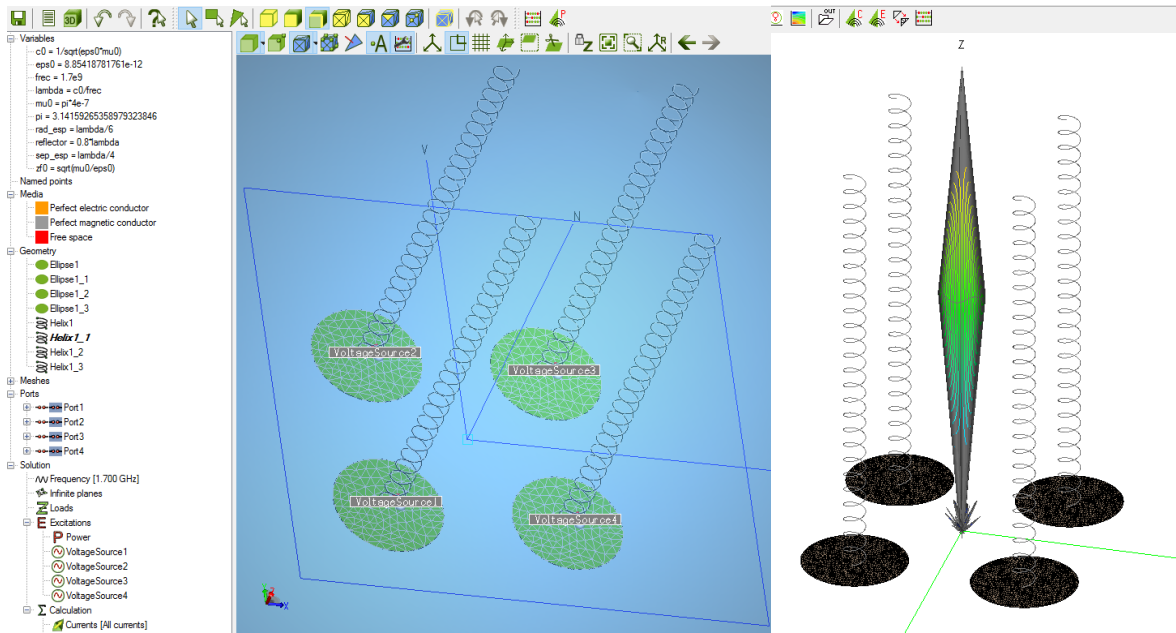


Figura 3.34.- Simulación de arreglo de antenas helicoidales.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

Con un arreglo de antenas de este tipo se obtiene una ganancia de 24,6 dB, superior a los 23 dB necesarios según el cálculo del enlace satelital que se muestra en el Anexo C.

La otra opción es la de utilizar una antena con disco reflector parabólico de 1,2 m. Anteriormente en la sección 3.4.3 se mostró el diseño e implementación de una antena con disco parabólico de 60 cm. En ese caso obtuvimos 17 dB de ganancia los cuales aún no son suficientes para el enlace previsto.

Para la simulación de esta antena tomamos como referencia el modelo “WR-AX-400D” de la empresa WINRADIO® [58].

Tabla 3.10.- Especificaciones Antena WR-AX-400D.

Tipo	Parabólica de paneles sólidos	Distancia focal	45 cm (17,7")
Diámetro	120 cm (3,94 ft)	Relación f/D	0,375
Ganancia Banda “L”	24 dBi	Peso	12 kg (26,5 lb)

Fuente: Tomado de [58].

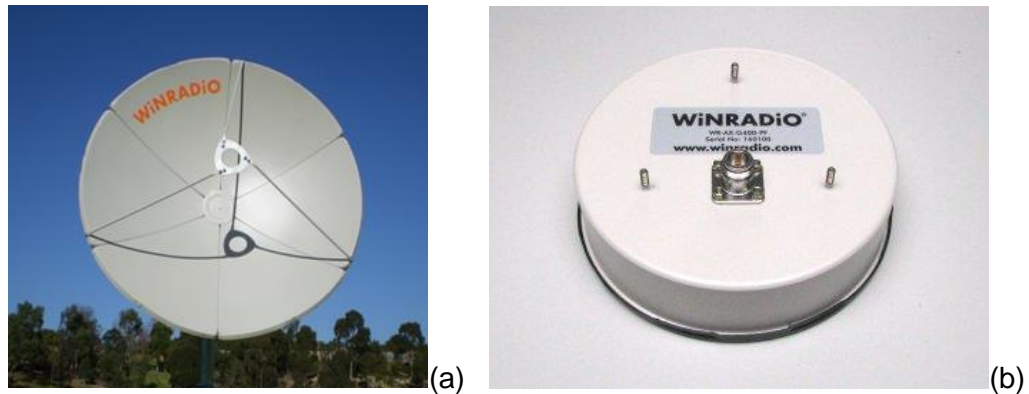


Figura 3.35.- (a) Disco parabólico WR-AX-400D. (b) Alimentador WR-AX-G400-PF.  
Fuente: Tomado de [58].

En la figura 3.35b, se muestra el alimentador WinRADIo “WR-AX-G400-PF” el cual tiene una impedancia de 50 Ohm y una ganancia de 8,5 dBi operando en la banda “L” con frecuencias de operación entre 1.690 y 1.710 MHz. El rendimiento óptimo de este alimentador se consigue cuando se monta centrado en el disco parabólico con una relación  $f/D$  de 0,35 a 0,4. Con la información mostrada en la tabla 3.10, se procede a simular en el *software* CADFEKO y los resultados se muestran a continuación en la figura 3.36 donde podemos observar que la ganancia en simulación llega a 37 dBi.

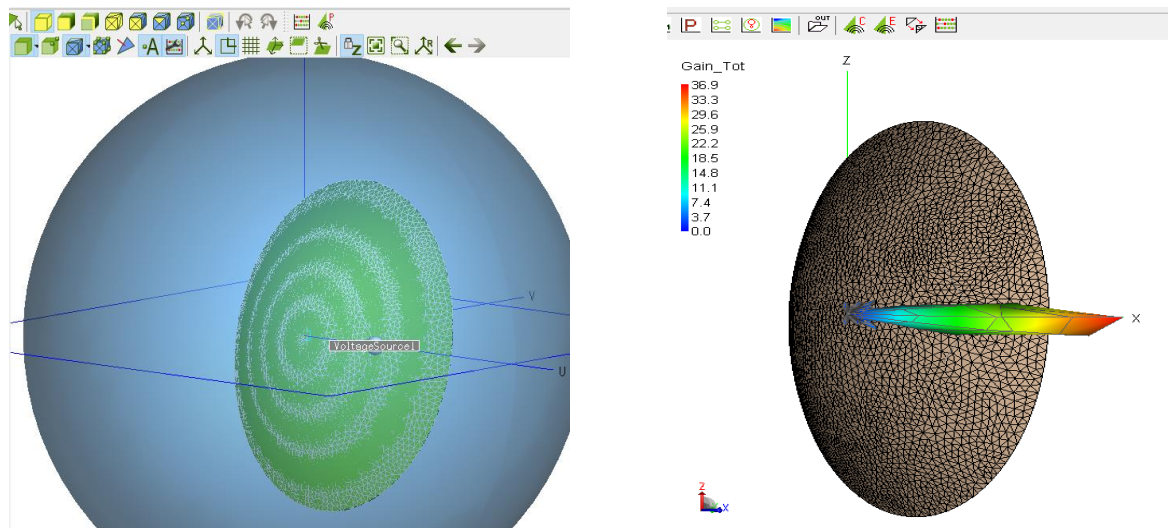


Figura 3.36.- Simulación de antena "WR-AX-400D".  
Fuente: Imagen Propia de los autores.

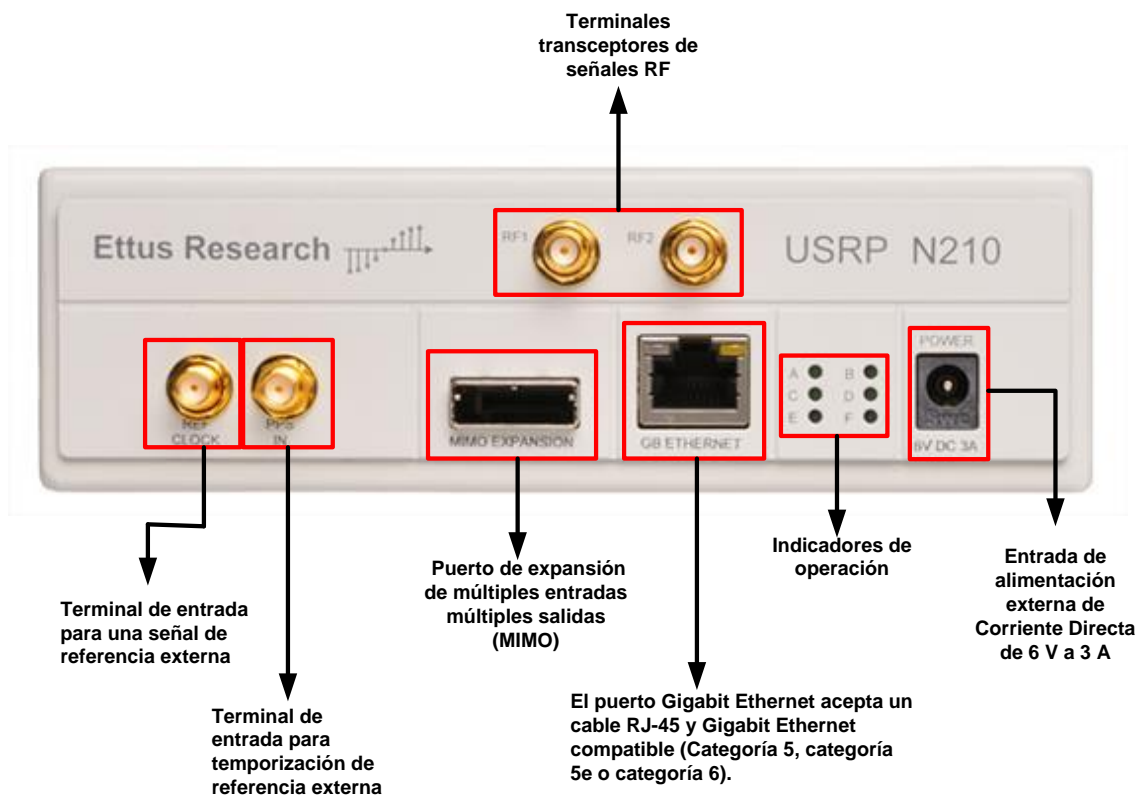
### 3.5. Universal Software Radio Peripheral (USRP).

El USRP sirve particularmente para el diseño e implementación de sistemas software radio. Se trata de un equipo SDR diseñado por la empresa ETTUS *Research* como hardware libre, donde los chips actúan como dispositivos de radio, con gran ancho de banda, convirtiéndose

en una plataforma de bajo costo que permite implementar y diseñar potentes sistemas de radiocomunicación [28]. En esencia el USRP sirve como procesador digital de banda base y convertor de frecuencia intermedia (FI) en un sistema de radiocomunicación.

### 3.5.1. Hardware del USRP N210.

El *hardware* del USRP N210 se muestra en la figura 3.37, es comúnmente usado para el desarrollo de aplicaciones que requieren un rendimiento de transmisión exigente de RF, incluyendo diseños avanzados de la capa física y creación de modelos o prototipos, el acceso dinámico al espectro y la radio cognitiva e incluso la comprobación técnica del espectro y la inteligencia de señales, grabación y reproducción [59].



**Figura 3.37.-** Panel frontal del USRP N210.  
Fuente: Tomada de [60]

La interfaz Gigabit Ethernet sirve de conexión entre el USRP y el ordenador central, permitiendo al usuario realizar tareas en tiempo real con un ancho de banda 50 MHz en dirección de recepción y de 25 MHz en las direcciones de transmisión, esto de forma simultánea (*full duplex*) [61].

Las salidas de los ADCs van conectadas a las entradas de los DDC. Estos mezclan, filtran y diezman las señales de entrada en la FPGA. Se utilizan en la recepción, esencialmente por dos razones:

1. Para convertir la señal en banda de frecuencia FI a una señal en banda base.
2. Para diezmar la señal, logrando que la tasa de datos pueda ser adaptada a la interfaz Gigabit Ethernet y que sea acorde a la capacidad de procesamiento del computador.

En la transmisión se realiza el proceso inverso, donde es necesario convertir una señal banda base a una señal de FI, y enviarla a través de los DACs. Este proceso lo realizan los DUC. En la transmisión se usan filtros interpoladores CIC (*Cascaded Integrator-Comb*) que interpolan las muestras antes de trasladar la señal digital a la frecuencia intermedia por el DUC. Los DDC y DUC combinados con altas tasas de muestreo simplifican en gran medida los requerimientos de filtrado analógico [62].

#### **3.5.1.1. UHD.**

UHD (USRP Hardware Driver) es el driver que se instala en el ordenador para que pueda interactuar con el USRP, es desarrollado por Ettus Research para la implementación de aplicaciones con los equipos de la familia USRP. Puede trabajar en los sistemas operativos Linux, Windows, y Mac. Posibilita una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) para la investigación de nuevos servicios que se pueden adaptar a los radios basados en software SDR. Los usuarios de UHD pueden realizar la comunicación del hardware USRP bajo plataformas de desarrollo de software como: GNURadio, LabVIEW, MATLAB, OpenBTS [63].

#### **3.6. GNURadio.**

GNURadio provee las librerías necesarias que permiten manipular y construir señales y sistemas de radio, también provee bloques de procesamiento de señal para implementar sistemas de radio definida por *software*, o sin *hardware* en un ambiente de simulación. Esta herramienta de desarrollo libre y abierta corre sobre sistemas GNU/Linux como Ubuntu [64].

Los bloques de procesado de señal son implementados en C++, las gráficas para GNURadio corren y son construidas en Python<sup>9</sup>. Conceptualmente un bloque procesa señales

---

<sup>9</sup> <http://www.python.org>

continuamente desde puertos de entrada hasta puertos de salida. Las partes de un bloque son: el puerto de entrada, el puerto de salida, y el tipo de dato que fluirá de uno al otro [64].

Aunque GNURadio incluye diversas y variadas funciones para realizar proyectos SDR, también permite al usuario incluir procesos no desarrollados o contemplados previamente en el proyecto mediante una serie de lineamientos bien establecidos. En la Figura 3.38 se observa la manera como GNURadio, siendo una biblioteca de lenguaje de programación Python, puede interactuar con bibliotecas de lenguaje C++ por medio de la herramienta de programación SWIG (*Simplified Wrapper and Interface Generator* - Envoltura Simplificada y Generador de Interfaz). Este programa funciona como un intérprete de lenguaje C++ a lenguaje Python, además a través de la herramienta CMAKE (*Cross Platform MAKE* – Compilador Multiplataforma), permite construir, probar y empaquetar códigos de programación [62].

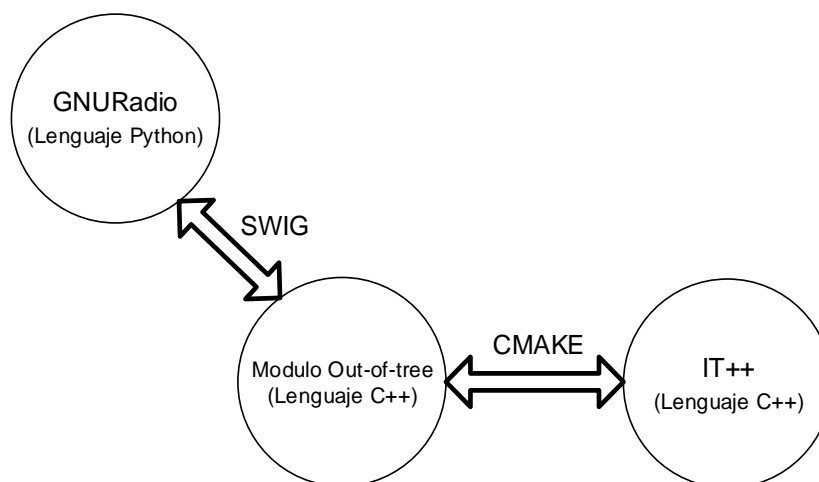


Figura 3.38.- Integración de GNURadio con bibliotecas externas.  
Fuente: Imagen propia de los autores, basada en [62].

Una forma de desarrollar sistemas de SDR en GNURadio es por medio de GNURadio *Companion* (GRC), que permite utilizar de una forma visual las funciones y bibliotecas de GNURadio. Esta herramienta gráfica es solo un intérprete y no un compilador porque interpreta los bloques y los convierte a código de lenguaje de programación Python, permitiendo al usuario la implementación de sistemas de procesamiento de señales sin conocimiento de Python [62].

Las características de los tipos de datos utilizados en GNURadio *Companion* son [62]:

- ✓ **Byte:** se conforma de un *byte* de datos, esto es, 8 bits por elemento.
- ✓ **Short:** consiste en un entero conformado por 2 bytes.
- ✓ **Int:** este tipo de datos se conforma por un entero de 4 bytes.

- ✓ **Float:** permite el punto flotante por medio de 4 bytes.
- ✓ **Complex:** es un arreglo de 8 bytes, que se compone de dos arreglos tipos *float*.

### 3.6.1. GNURadio *Companion*.

GNURadio *Companion* consiste en un *software* de interfaz gráfica que permite el diseño de sistemas y aplicaciones, su entorno de programación gráfico es muy similar a Simulink y LabVIEW debido que este también emplea un entorno de programación visual [65].

Una aplicación de GNURadio *Companion* consiste en la interconexión de bloques, por lo que, se puede realizar una clasificación de los tipos de bloques que existen:

- ✓ **Bloques Fuente:** bloques iniciales que solo cuentan con salidas, como fuentes de audio, ficheros de texto, etc.
- ✓ **Bloque de Procesamiento:** bloques que se encargan del procesado de la señal, como filtros, amplificadores, moduladores, demoduladores, etc.
- ✓ **Bloques Sumidero:** bloques que permiten la visualización de la señal transmitida y receptada, como espectro, constelación, ruido, etc.

Para realizar una aplicación en GNURadio *Companion* se debe buscar y seleccionar el bloque requerido, moverlo hacia el entorno de programación e interconectarlos en la Figura 3.39, en el orden preciso y la cantidad de bloques variará dependiendo de las características del sistema que vamos a implementar.

Para la correcta instalación y funcionamiento del *software* de GNURadio *Companion* se lo instalo en el Sistema Operativo Ubuntu 14.02.2 LTE, los pre-requisitos y los pasos a seguir para la instalación se encuentran en el anexo B.

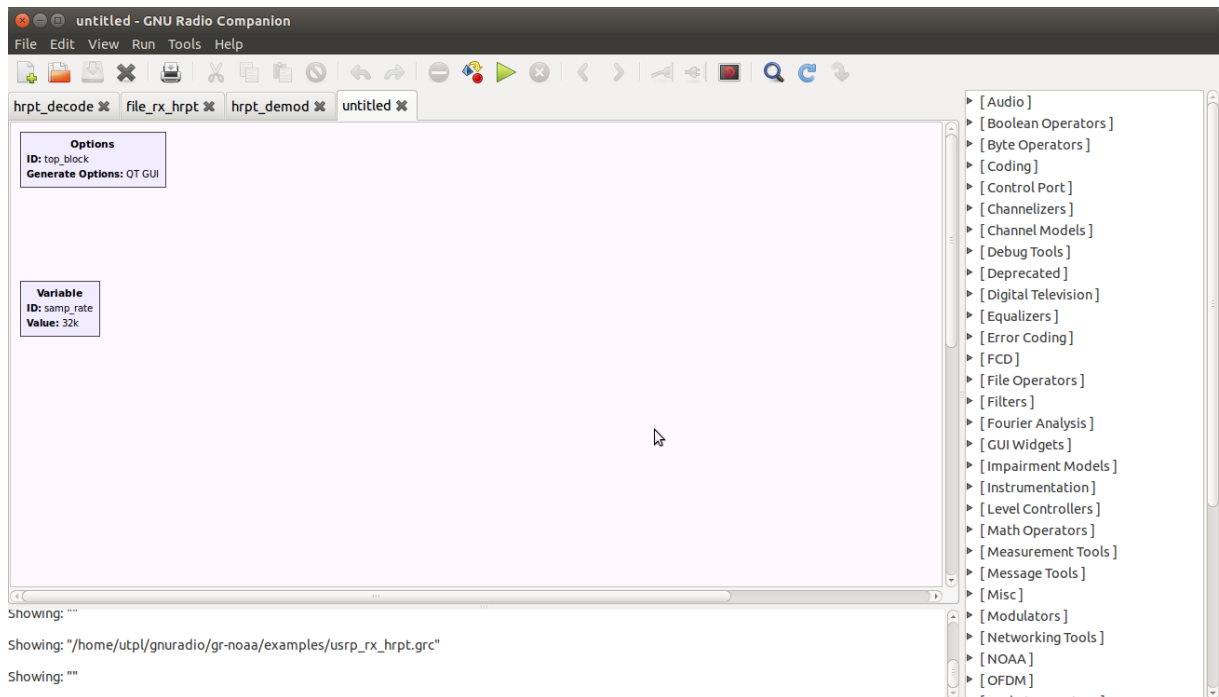


Figura 3.39.- Entorno gráfico de GNURadio *Companion*.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

### 3.7. Sistema de recepción en GNURadio *Companion*.

Para el desarrollo del receptor basado en [66], donde se efectúa el procesamiento en banda base de la señal que se recibe; se realiza las funciones de demodular, sincronizar y desentramar la señal digital HRPT captada del satélite meteorológico y guardarla en un archivo *.hrpt*. El archivo almacena una serie de 11.090 palabras, 16 bits por palabra correspondiente al formato de trama menor de HRPT (solo los menores de 10 bits por palabra son significativos).

Para la realización del GUI se han empleado los bloques y configuraciones mostradas en la figura 3.40.

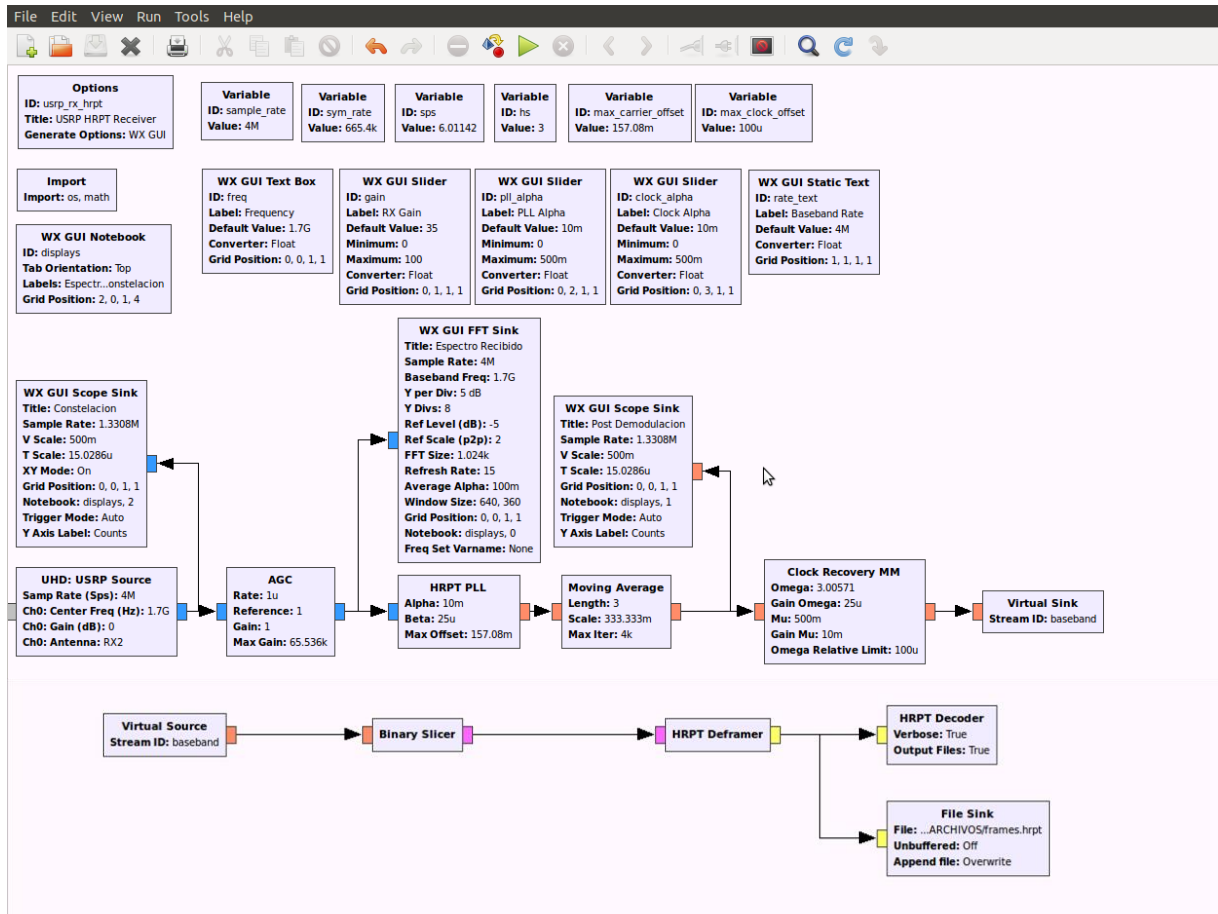


Figura 3.40.- Receptor desarrollado en GNU Radio Companion.  
Fuente: Imagen propia de los autores, basado en [66].

El bloque que se usa para conectar el USRP y recibir las señales emitidas por el satélite, es el bloque fuente **UHD: USRP Source** (figura 3.41), este bloque se encarga de recibir las señales desde el USRP a través de la interfaz Gigabit Ethernet para su procesamiento en el computador

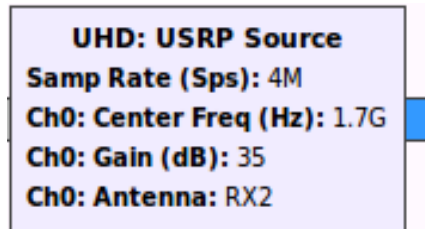


Figura 3.41.- Bloque de conexión de USRP.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

La configuración del bloque **UHD: USRP Source** se muestra en la figura 3.42.



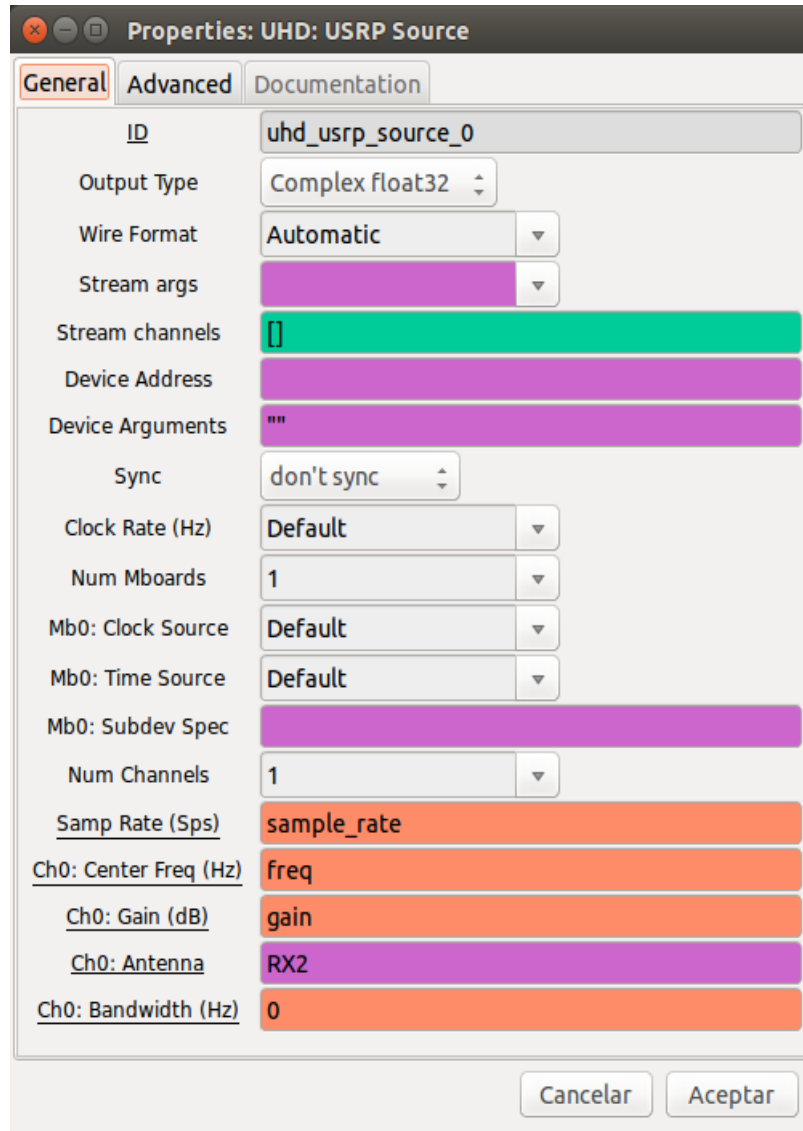


Figura 3.42.- Propiedades UHD: USRP Source.

Fuente: Imagen propia de los autores.

En este bloque se encuentran los siguientes parámetros:

- ✓ **sample\_rate**: que hace referencia a la frecuencia de muestreo y se relaciona directamente con el ancho de banda que se va a emplear para la recepción de la señal digital, que para HRPT es de aproximadamente 4-5MHz.
- ✓ **Freq**: que es la frecuencia central del satélite en HRPT del cual vamos a recibir (NOAA 15, 18 19).
- ✓ **gain**: que es la sensibilidad de recepción del USRP.
- ✓ **RX2**: es el puerto frontal seleccionado que va a elegir para la conexión del sistema de radiación.

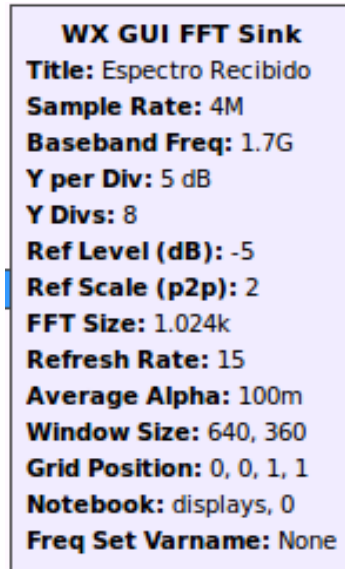


Figura 3.43.-Bloque WX GUI FFT Sink.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

En la figura 3.43 se puede observar el bloque **WX GUI FFT Sink** que permite obtener la transformada rápida de Fourier (FFT) y poder observar el espectro de la señal que se está recibiendo en el dominio de la frecuencia.

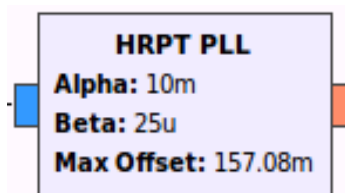


Figura 3.44.- Bloque Moving Average GNURadio.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

El bloque **HRPT PLL** (figura 3.44) permite elevar el nivel de la señal y establecer el último pase de banda del sistema para la demodulación de fase.

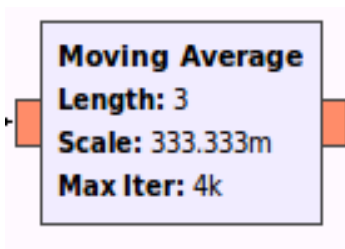


Figura 3.45.- Moving Average en GNURadio.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

El **Moving Average** (figura 3.45) implementa un filtro básico de movimiento promedio que se utiliza como una forma simple de suavizar una señal ruidosa.

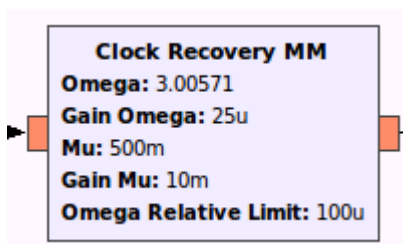


Figura 3.46.- Bloque Clock Revery MM.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

El bloque de la figura 3.46 permite recuperar muestras de una señal con la misma frecuencia y fase que los utilizados por el satélite para sincronización. Esto es necesario, por ejemplo, cuando se quiere extraer símbolos de una señal digital asíncrona. Se le permite sincronizar el receptor con los centros de unos y ceros presentes en la señal.

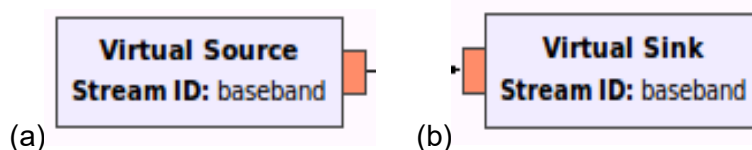


Figura 3.47.- Conexiones virtuales. (a) Virtual Source. (b) Virtual Sink.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

El bloque **Virtual Source** y el bloque **Virtual Sink** (figura 3.47) nos permite crear conexiones virtuales en GNURadio *Companion*. Para crear una conexión virtual, el puerto fuente de un bloque debe estar conectado a un bloque **Virtual Sink**. A continuación, el puerto sumidero de otro bloque debe estar conectado a una fuente de bloque virtual. La conexión virtual se crea cuando se introduce un ID (baseband) que debe ser el mismo tanto en el **Virtual Sink** como en el **Virtual Source**.

En la figura 3.48 se pueden ver los bloques que permiten la recuperación de la señal de flotante a muestras de bits, luego se sacan las tramas de HRPT recibidas de la señal en bits, después se procede a la decodificación de las tramas de la señal y por ultimo al guardado de la señal desentramada en un archivo de formato **.hrpt**.

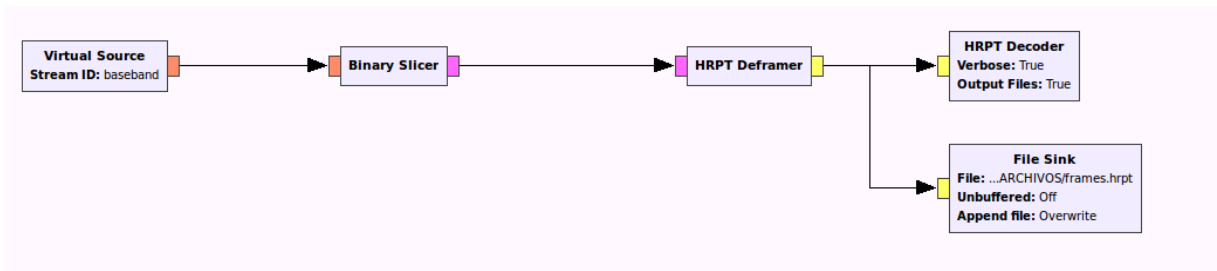


Figura 3.48.- Desentramado, decodificación y generación del archivo *.hrpt*.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

### 3.8. Software de visualización de Imágenes.

El *software* utilizado para visualización imágenes es *HRPT Reader*<sup>10</sup> programa desarrollado por David Taylor, este programa permite leer archivos HRPT en formatos NOAA Nivel 1B, SSB/Orbit, NOAA95, entre otros. *HRPT Reader* lee archivos con extensión *.n16*, *.NO*, *.WI*, *.hrpt*. Desde los Archivos de Satélites Activos (AEA) se puede leer ALC, GAC FRAC y formatos de datos HRPT [67].

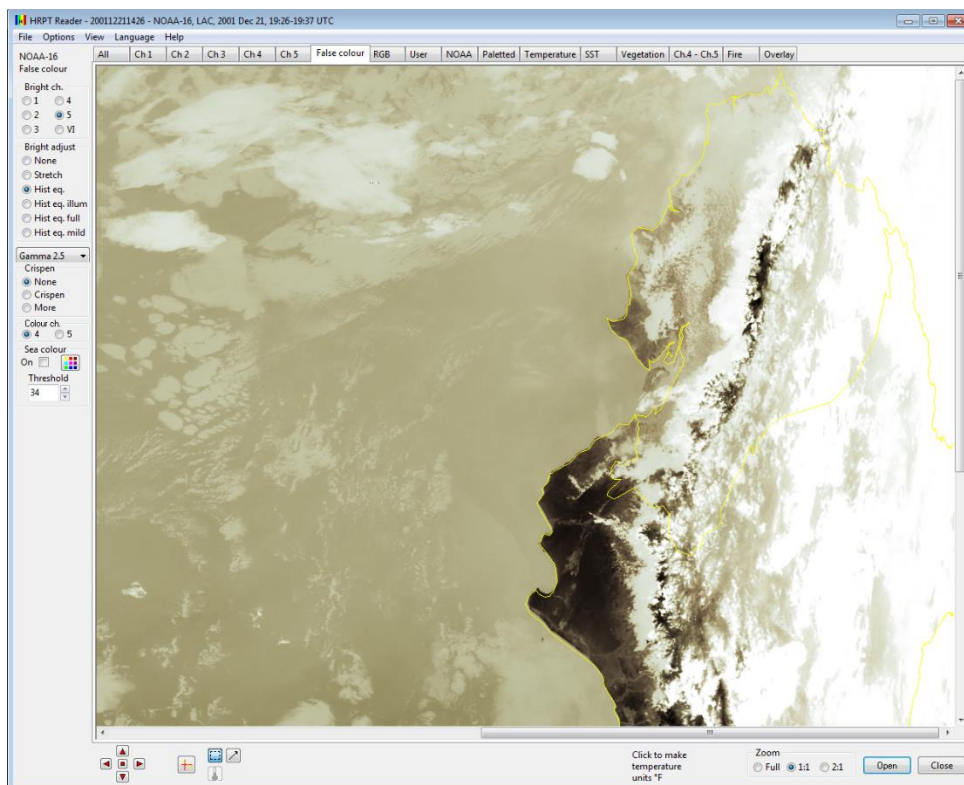


Figura 3.49.- Interfaz de HRPT Reader.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

<sup>10</sup> <http://www.satsignal.eu/software/hrpt.htm>

En la figura 3.49 se puede visualizar la interfaz gráfica del programa, en la que se encuentra cargado un archivo .n16 imagen HRTP captado por el satélite meteorológico NOAA16, este archivo fue facilitado por el Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil de la UTPL. El programa permite visualizar imágenes en falso color mediante la combinación de los cinco disponibles canales en rojo, verde y azul o mediante la adopción de uno de los canales visibles como el brillo y uno de los canales Infrarrojos (IR). HRPT Reader permite guardar la imagen HRPT en una imagen de tamaño APT.

**CAPÍTULO IV**  
**PRESUPUESTO DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO**

#### 4.1. Sistemas comerciales.

Se han tomado como referencia cinco sistemas de altas prestaciones, los mismos que se detallan a continuación.

##### 4.1.1. HRPT/CHRPT Weather Satellite System.

Las características más importantes del Sistema de la empresa australiano-estadounidense WiNRADiO®<sup>11</sup>, se muestran en la tabla 4.1. [68]

Tabla 4.1.- Especificaciones del sistema WSS-420 HRPT/CHRPT de WINRADIO.

<b>Datos</b>	HRPT, CHRPT.
<b>Satelitales soportados</b>	NOAA, Feng Yun.
<b>Frecuencias de operación</b>	1680 - 1712 MHz (Banda L).
<b>Demodulador</b>	BPSK.
<b>Formatos de imagen de salida</b>	BMP, JPG, GIF, TIF, PNG.
<b>Antena</b>	Parabólica de 120 cm de diámetro.
<b>Polarización de la antena</b>	RHCP.
<b>Ganancia de la antena</b>	24 dBi.
<b>Precisión de tracking</b>	$\pm 0.5^\circ$ .
<b>Velocidad del rotor</b>	4-5 grados/s.
<b>Peso del rotor</b>	13.5 kg (29.7 lbs).

Fuente: Tomada de [68].

Los componentes de este sistema se detallan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2.- Componentes del sistema WSS-420 HRPT/CHRPT de WINRADIO.

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
 <b>Rotor WR-ARP-ELAZ-100</b>	El rotor "WR-ARP-ELAZ-100" es de construcción robusta con engranajes de acero de alta calidad, Este rotor de elevación y azimut logra con una precisión de $\pm 0,5$ grados. Mediante software se puede realizar una calibración para el posicionamiento automático, pero también tiene una unidad de control manual.

<sup>11</sup> <http://www.winradio.com/>



**Disco parabólico WR-AX-400D**

Tiene un diámetro de 120 cm, con una distancia focal de 45 cm, construido a partir de seis paneles de acero sólido. Tiene tres brazos de soporte para el alimentador. La ganancia del plato es de 24 dBi en la banda L y de 40 dBi en la banda Ku.



**Alimentador WR-AX-G400-PF**

Este "Patch Feeder" es un alimentador de banda L con polarización circular y optimizado para la banda de frecuencias de 1690-1710 MHz. Proporciona una ganancia de 8,5 dBi y una ROE de 1,15 alrededor del centro de este rango de frecuencias. La carcasa está hecha de aluminio reforzado con recubrimiento anti polvo.



**Software para seguimiento automático WR-RCU-100-ATC**

Es un aplicación para controlar el rotor y realizar el seguimiento automático de cualquier satélite activo que posea los datos de keplerianos. Esto se aplica a cientos de satélites en muchas categorías diferentes, incluyendo la comunicación satelital militar, científica y meteorológica.



**downconverter WR-G400**

Es una unidad categoría IP-65 que convierte un bloque de frecuencias de banda L a VHF, en torno a 142 MHz. Traduce un rango de frecuencia de entrada de 1680 a 1712 MHz hacia un rango de frecuencia de salida de 127 a 159 MHz con una ganancia fija de 55 dB.



 <p><b>Receptor de datos meteorológicos WR-G420i HRPT / CHRPT</b></p>	<p>Es un receptor BPSK basado en DSP avanzada que demodula coherentemente los datos de los satélites NOAA y Fengyun-1D en HRPT y CHRPT. El receptor tiene un rango de frecuencia de entrada de 120-160 MHz.</p>
 <p><b>Software decodificador de datos meteorológicos WR-WSDA-420</b></p>	<p>Es una aplicación que ofrece un amplio conjunto de herramientas muy valiosas para el estudio de los datos meteorológicos ya sea para aficionados o con fines profesionales, se puede determinar la temperatura superficial del mar, temperatura de la superficie terrestre, índice de vegetación y más.</p>

Fuente: Tabla propia de los autores, basado en [68].

El costo de venta al público de este sistema es de aproximadamente \$70.000 dólares americanos [68].

**4.1.2. HRPT/AHRPT System.**

El sistema comercializado por la empresa DARTCOM, actualmente es uno de los sistemas con las más altas prestaciones para la obtención de imágenes meteorológicas satelitales de alta resolución. Este sistema está siendo utilizado, entre otros, por el instituto español de oceanografía y por la Marina Real Británica en una misión en la Antártida [69].

Tabla 4.3.- Especificaciones del sistema HRPT/AHRPT de DARTCOM.

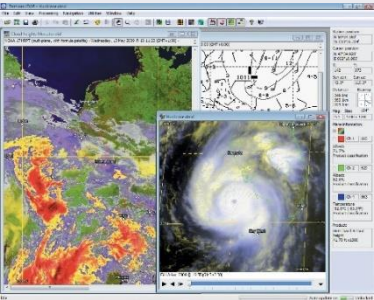
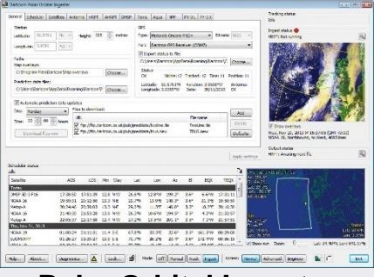
<b>Datos</b>	HRPT, AHRPT, CHRPT
<b>Satelitales soportados</b>	NOAA, MetOp, GOES, Feng yun-3
<b>Frecuencias de operación</b>	1682 - 1710 MHz (Banda L).
<b>Formatos de imagen de salida</b>	BMP, JPG, GIF, TIF, PNG.
<b>Antena</b>	Parabólica de 120 cm de diámetro, también disponibles en 150 y 180 cm.
<b>Polarización de la antena</b>	RHCP.
<b>Ganancia de la antena</b>	24,4dBi, 26 dBi y 27,5dBi según el diámetro de la antena.
<b>Precisión de tracking</b>	$\pm 0.1^\circ$ .

Fuente: Tomada de [69].

Los componentes de este sistema se detallan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4.- Componentes del sistema HRTP/AHRPT de DARTCOM.

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
 <p><b>Antena parabólica y rotor DARTCOM</b></p>	<p>La antena parabólica de 120 cm de diámetro tiene una ganancia de 24,4 dBi para una frecuencia central de operación de 1,7 GHz. Su alimentador tiene polarización circular y posee un downconverter integrado que lleva las frecuencias de entrada de la banda L a una frecuencia intermedia de 117 - 145 MHz.</p> <p>El rotor es una unidad compacta que provee un giro de 180° en elevación y 359,9° de azimut con una precisión de seguimiento de <math>\pm 0.1^\circ</math>. El conjunto de disco y rotor está montado sobre un pedestal de acero galvanizado.</p>
 <p><b>Receptor digital LRD-200B</b></p>	<p>Este receptor multi-modo digital puede ser empleado en la recepción de señales HRPT, AHRPT de satélites NOAA, MetOp, Fengyun. Tiene una sensibilidad de <math>-90\text{dBm}</math> a <math>-20\text{dBm}</math>, demodula señales BPSK, QPSK, PSK, 8PSK y 16QAM</p>

 <p><b>Software iDAP/MacroPro</b></p>	<p>Software para el procesamiento de la señal digital, decodifica las imágenes meteorológicas.</p>
 <p><b>Polar Orbital Ingester</b></p>	<p>Software para el seguimiento automático de los satélites</p>

Fuente: Tabla propia de los autores, basado en [69].

El costo comercial de este sistema, según información proporcionada por ADR TECHNOLOGY que es un distribuidor autorizado para América Latina, está entre las 70 y 80 mil libras esterlinas, es decir puede superar los \$100.000 dólares americanos.

#### 4.1.3. HRPT Data Capture Engine.

El HRPT Data Capture Engine de la empresa Quorum Communications es un completo sistema de adquisición de datos para la banda L de transmisión directa HRPT de los satélites meteorológicos de la serie NOAA. El sistema también puede ser equipado opcionalmente para recibir transmisiones de satélite similares como el Feng Yun 1 [70].

Las características más importantes de este sistema se muestran en la tabla 4.5.

Tabla 0.5.- Especificaciones del sistema HRTP Data Capture Engine.

<b>Datos satelitales soportados</b>	HRPT, CHRPT, AHRPT, GVAR, PDUS
<b>Frecuencias de operación</b>	NOAA, MetOp, GOES, Feng yun, Meteosat
<b>Antena</b>	Banda L 1682 - 1710 MHz
<b>Polarización de la antena</b>	Parabólica de 120 cm de diámetro.
<b>Ganancia de la antena</b>	RHCP.
	24 dBi.

Fuente: Tomada de [70].

Los componentes de este sistema se detallan en la tabla 4.6.

Tabla 0.6.- Componentes del sistema HRTP Data Capture Engine.

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
 <p data-bbox="277 719 799 786"><b>Antena parabólica y posicionador de HRPT Data Capture Engine</b></p>	<p data-bbox="876 517 1374 685">Consiste en una antena parabólica, 1.2m preamplificador de bajo ruido y downconverter integrado, postes de soporte de alimentación, posicionador de antena con el disco de montaje.</p>
 <p data-bbox="368 1115 707 1149"><b>Posicionador de antena</b></p>	<p data-bbox="876 869 1374 1133">El cable de control del posicionador lleva tanto el control de baja tensión y señales de estado y de alta tensión. El posicionador utiliza motores de corriente alterna de 115 voltios. La potencia del motor se proporciona para el posicionador por un relé de estado sólido.</p>
 <p data-bbox="277 1509 799 1543"><b>Controlador de antena PC-HRPT-ST1</b></p>	<p data-bbox="876 1312 1374 1447">Tarjeta PC-HRPT-ST1 para control de antena en una ranura ISA libre. Esta placa utiliza direcciones de E / S de 0x314 a 0x317.</p>
 <p data-bbox="376 1839 699 1872"><b>Receptor Metcom DSP</b></p>	<p data-bbox="876 1615 1374 1879">convierte la señal de entrante de RF a una señal de ancho de banda limitada y a una señal de 70 MHz de IF que después es digitalizada directamente a 50 MSPS (millones de muestras por segundo) con una resolución de 10 bits. Se conecta con el computador a través de una interfaz RS-232.</p>

El costo comercial de este sistema según [71] es alrededor de \$67.000 dólares americanos.

#### 4.1.4. MORCOM Weather Satellite Systems.

Este sistema trabaja en un entorno interactivo con sistema operativo Windows XP o Vista. Además de una estación de trabajo PC, el sistema incluye una antena de seguimiento totalmente automático y *software* de procesamiento. El sistema además ofrece los dispositivos de almacenamiento masivo, impresoras a color de alta calidad, y sistemas de UPS [72]. Algunas especificaciones de este sistema se muestran en la tabla 4.7.

Tabla 0.7.- Especificaciones del sistema MORCOM Weather Satellite Systems.

<b>Datos</b>	HRPT
<b>satelitales soportados</b>	NOAA
<b>Frecuencias de operación</b>	1071,3 - 1707 MHz
<b>Antena</b>	Parabólica de 1.8 m
<b>Ganancia de la antena</b>	24 dBi
<b>Polarización de la antena</b>	RHCP.
<b>Rotor</b>	Controlador de seguimiento de azimuth/elevación de baja tensión con enlace de control serial asíncrono.
<b>Precisión del rotor del tracking</b>	$\pm 0.5^\circ$ .
<b>Velocidad del rotor</b>	4-5 grados/s.

Fuente: Tomada de [72].

Los componentes de este sistema se detallan en la tabla 4.8.

Tabla 0.8.- Componentes del sistema MORCOM Weather Satellite Systems.

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
 <p><b>Antena parabólica, alimentador, rotor MORCOM</b></p>	<p>Se compone de un plato parabólico de 1,8m para la señal HRPT en la banda L, en un pedestal con motores AZ y EL. El seguimiento se realiza automáticamente por nuestro programa de seguimiento.</p>

 <p><b>Controlador de antena</b></p>	<p>El controlador de antena está diseñado mediante el uso de técnicas de control de servo bien conocidos como el controlador PID (P: proporcional, I: integral y D: derivado) que asegura una correcta orientación de la antena y seguimiento del satélite. Los motores son DC con un control que es proporcionada por la PWM. Los amplificadores PWM están protegidos contra cortocircuito, sobrecarga, etc.</p>
 <p><b>El alimentador integrado/Preamplificador de bajo Ruido</b></p>	<p>El alimentador integrado/Preamplificador de bajo Ruido están empaquetados en una caja de intemperie para aplicaciones al aire libre que está en la alimentación de la antena.</p>
<p><b>Downconverter de banda L a banda VHF</b></p>	<p>Consta de un amplificador de banda L, un filtro de pasa banda, un mezclador con un oscilador local que trabaja con 1560 MHz, y un amplificador de VHF. La entrada y la impedancia de salida son de 50 ohmios.</p>
<p><b>Estación de trabajo</b></p>	<p>Para la captación de datos y el software de visualización se tiene POES Box Pass Posición software de seguimiento y tarjeta de recepción NOAA DSP HRTP.</p>

Fuente: Tabla propia de los autores, basado en [72].

#### 4.1.5. TimeStep Professional (C) HRPT AVHRR Systems.

Durante mucho tiempo TimeStep ha estado vendiendo el sistema de costo más bajo de HRPT. TimeStep ofrece sistema de HRPT para uso profesional y en zonas de fuertes vientos, alta humedad, altas temperaturas y áreas sensibles a la estática, donde la alta fiabilidad es

esencial. El uso de componentes procedentes de otros fabricantes especializados ha permitido que TimeStep suministre un sistema verdaderamente profesional a un precio moderado [73].

En la tabla 4.9 se detallan algunas de sus características.

Tabla 0.9.- Características del sistema TimeStep.

<b>Datos</b>	HRPT, CHRPT
<b>satelitales soportados</b>	NOAA, Feng Yun
<b>Frecuencias de operación</b>	1690-1710MHz
<b>Antena</b>	Parabólica de 90 cm
<b>Ganancia de la antena</b>	20 dBi
<b>Polarización de la antena</b>	RHCP.

Fuente: Tomada de [73].

Los componentes de este sistema se detallan en la tabla 4.10:

Tabla 0.10.- Componentes del sistema TimeStep.

<b>COMPONENTE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<div data-bbox="293 1162 820 1570" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="325 1592 812 1659"><b>Antena parabólica, posicionador y preamplificador</b></p>	<p data-bbox="938 1261 1374 1559">El plato de este sistema es de 90 cm (3 pies) y está equipado con una unidad posicionador Yaesu para azimut y elevación. El alimentador helicoidal está conectado directamente con el preamplificador que se monta directamente detrás de la alimentación.</p>

 <p><b>Preamplificador a 1.7GHz PHEMT</b></p>	<p>Este preamplificador a 1.7GHz está considerado por muchos como el mejor disponible, tiene un factor de ruido de tan sólo 0.45dB. Cubre desde 1690-1710MHz con 35 dB de ganancia. El rango de tensión es 8-14 a una corriente de 80 mA y puede ser alimentada automáticamente por el cable del receptor, cuenta con un conector N para la entrada y conector tipo F en la salida.</p>
 <p><b>Receptor HRPT</b></p>	<p>Tiene un medidor de intensidad de señal de bobina móvil para permitir el ajuste fácil. El control por ordenador de la selección de canal está disponible si es necesario para un funcionamiento totalmente automático.</p>
 <p><b>Interfaz USB HRPT</b></p>	<p>Permite conexión por medio de interfaz USB, incluye una sección de procesamiento analógico con integradores y un circuito de recuperación de reloj PLL lineal.</p>

Fuente: Tabla propia de los autores, basado en [73].

El sistema completo que contiene disco parabólico, alimentador, preamplificador de bajo ruido, downconverter, 100m de cable, posicionador de antena, sistema de seguimiento automático, Receptor digital, *software* de interfaz para HRPT, tiene un costo de \$33,000 USD aproximadamente según [74].


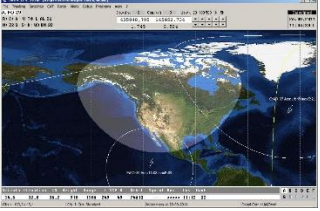
#### 4.2. Costo del sistema propuesto.

La principal ventaja del sistema propuesto es su relativo bajo costo frente a los sistemas mostrados en el apartado 4.1. En la tabla 4.11 se indica el precio unitario de los elementos que conforman el sistema y como se puede observar el costo total es de \$7394.



Tabla 0.11.- Costo de los componentes del sistema propuesto.

Descripción	Precio (USD)
 <p><b>Rotor YAESU-G5500</b></p>	750
 <p><b>Antena Parabólica con alimentador y soportes</b></p>	2000
 <p><b>Computador</b></p>	800
 <p><b>Circuito controlador + Arduino nano</b></p>	70
 <p><b>USRP N210</b></p>	2000
 <p><b>Amplificador de bajo ruido</b></p>	250

 <p><b>Downconverter</b></p>	1364
 <p><b>Software de seguimiento</b></p>	0
<p><b>Estructura de soporte</b></p>	100
<p><b>Otros (cables, conectores)</b></p>	60
<p><b>TOTAL</b></p>	<b>\$ 7394</b>

Fuente: Tabla propia de los autores.

Los precios de algunos de los componentes están basados en una cotización con fecha 09/11/2015 realizada a la empresa *Megalite del Ecuador Cia. Ltda.*, empresa autorizada para la distribución de productos WiNRADiO.

## CONCLUSIONES

Cumplidos finalmente los objetivos propuestos, y finalizada la etapa de investigación y ejecución del presente trabajo de titulación, se exponen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. SDR proporciona una solución eficiente y de bajo costo en comparación con los sistemas tradicionales; debido a que los componentes típicamente implementados en hardware (receptor, demodulador, decodificador, etc.) son efectuados mediante software, por lo que se reduce los componentes que se utiliza en las actuales estaciones terrenas para la obtención y decodificación de la señal.
2. El sistema para el seguimiento automático de los satélites se determina que el error es de aproximadamente 1%, resultado pertinente para este tipo de aplicaciones.
3. Se determina que las antenas deben tener una ganancia superior a 24 dBi a partir del cálculo costo de enlace y en base al análisis de distintos sistemas radiantes se establece que se pueden emplear un arreglo de cuatro antenas helicoidales o una antena con reflector parabólico, que tengan polarización circular.
4. Al realizar una comparación en cuanto a costos que representa este sistema frente a los sistemas comerciales tradicionales, notamos que un sistema como el propuesto tiene un costo inferior a \$10.000 y los sistemas comerciales se acercan a los \$100.000 dólares.
5. En cuanto al efecto Doppler, la desviación de frecuencia causada por este efecto es de  $\pm 34$  kHz, es decir para el caso del satélite NOAA 19 que tiene una frecuencia de operación en HRPT de 1.698,0 MHz, la variación de frecuencia iría desde 1.698,03 MHz hasta 1.697,67 MHz. Y teniendo en cuenta que el ancho de banda del receptor es configurable hasta 8 MHz, esta pequeña variación se considera despreciable.
6. Este sistema basado en SDR se puede extender para obtener imágenes de otros satélites o cuando se realicen actualizaciones del sistema de transmisión satelital. Para este fin se requiere de modificaciones o de actualizaciones en el software.

## RECOMENDACIONES

1. Para un correcto funcionamiento del sistema operativo de Ubuntu, se debe realizar una actualización de paquetes, esto se lo puede hacer con los comandos *update* y *upgrade* en el terminal de comandos de Ubuntu, con esto se descargan y se actualizan las librerías para GNURadio, de esta forma se evita errores en la instalación del *software* de programación.
2. Es importante abrir el entorno gráfico de GNURadio *Companion* mediante en modo de usuario privilegiado con el comando “**sudo su**”, esto para que contemos con todos los permisos para la utilización del mismo.
3. En el caso que se opte por la construcción de la antena para el sistema de radiación primeramente se recomienda diseñar y simular, luego implementar y utilizar equipos de medición para comprobar su ganancia y ROE, antes de hacer las pruebas de recepción.
4. Basados en el análisis de los cinco sistemas profesionales mostrados en el capítulo 4, se recomienda utilizar un amplificador de bajo ruido para compensar las pérdidas que se pueden producir en las líneas de transmisión y amplificar las señales débiles que llegan al receptor.
5. Antes de realizar el seguimiento automático de los satélites, siempre debemos hacer una actualización de los datos keplerianos en el software que estemos utilizando para el tracking de los satélites, así se garantiza que las coordenadas de cada satélite son las correctas respecto a la estación terrena.
7. Al momento de montar la antena en el rotor para el seguimiento de los satélites, se recomienda utilizar un contrapeso que ayude a equilibrar el torque y así evitar que el rotor realice un sobreesfuerzo.

## REFERENCIAS

- [1] EESA European Space Agency, "Las Órbitas de los Satélites", [en línea], disponible en: [http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_ES/SEMXM3E3GXF\\_0.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMXM3E3GXF_0.html). [Consulta del 29/08/2015].
- [2] C. Rosado, «"Comunicación por satélite Principios, tecnologías y sistemas", Asociación Hispanoamericana de Centros de Investigación y Empresas de Telecomunicaciones", [en línea], disponible en: <https://uahc.files.wordpress.com/2014/01/comunicaciones-por-satelite.pdf>.» [En línea]. [Último acceso: 27 Agosto 2015].
- [3] «A. Ávila Pérez, M. Anaya Montaña, D. Contreras Cortés, "Método Grafico para Estimar la Atenuación por Lluvia en el Sistema Satelital Mexsat 3", Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Electrica.,» México D.F., 2015.
- [4] «Repositorio digital de la Facultad de Ingeniería – UNAM, "Capítulo 1 Satélites Geoestacionarios",» [En línea] disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/162/A4.pdf?sequence=4>. [Consulta del 29/08/2015]».
- [5] J. Ramírez Marín, "Comunicación vía satélite", [en línea], disponible en: <http://www3.diputados.gob.mx/camara/content/download/193821/464902/file/comunicacion%20via%20satelite.pdf>. [Consulta del 29/07/2015].
- [6] Escuela Superior Politécnica del Litoral. "Uso en el Ecuador de los servicios que prestarán los Satélites de INTELSAT series VIII". [en línea] disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3229/1/5748.pdf>. [Consulta del 29/08/2015].
- [7] "Estaciones Espaciales", [en línea] disponible en: <http://www.astromia.com/glosario/estacionesespaciales.htm>. [Consulta del 29/08/2015].
- [8] Allmetsat, "Los Satélites Meteorológicos", [en línea], disponible en: <http://es.allmetsat.com/>. [Consulta del 28/08/2015].
- [9] F. Reuter, "Plataformas Orbitales y sensores", Universidad Nacional de Santiago de Estero, [en línea], disponible en: <http://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-34-Plataformas-orbitales-y-sensores-REUTER.pdf>. [Consulta del 29/08/2015].
- [10] VADEMECUM REMER, "Satélites Meteorológicos", [en línea], disponible en: <http://www.proteccioncivil.org/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum12/vdm031.htm#3101>. [Consulta del 28/08/2015].
- [11] Departamento de Ciencias de la Atmósfera Facultad de Ciencias, "Satélites Meteorológicos." [en línea], disponible en:

[http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/climatologia/practico\\_climatologia\\_2011/Satelites%20Meteorologicos.pdf](http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/climatologia/practico_climatologia_2011/Satelites%20Meteorologicos.pdf). [Consulta del 27/08/2015].

- [12] National Oceanic and Atmospheric Administration, "geostationary satellite (GOES)", [en línea], disponible en: <http://www.noaa.gov/topic-tags/geostationary-satellite-goes>. [Consulta del 29/082015].
- [13] National Oceanic and Atmospheric Administration, "Polar-orbiting satellite (POES)" [en línea], disponible en: <http://www.noaa.gov/topic-tags/polar-orbiting-satellite-poes>. [Consulta del 29/082015].
- [14] Fedora Core Test Page, "LOS SATELITES METEOROLOGICOS" [en línea], disponible en: <http://200.58.146.28/nimbus/weather/pdf/cap12.pdf>. [Consulta del 27/08/2015].
- [15] «UIB Universitat de les Illes Balears, "TELEDETECCIÓN: APLICACIONES METEOROLÓGICAS." [en línea], disponible en: <http://www.uib.cat/depart/dfs/meteorologia/web-grup/teledeteccio/SIG/APLI-MET-SIG-2007.pdf>. [Consulta del 27/08/2015].».
- [16] "Teoría de las Telecomunicaciones", [en línea], disponible en: <http://www.urbe.edu/info-consultas/web-profesor/12697883/articulos/Comunicaciones%20Satelites%20y%20Celulares/Teoria%20de%20las%20Telecomunicaciones.pdf>. [Consulta del 28/08/2015].
- [17] Observaciones y previsiones meteorológicas - Imágenes satélite - Valores climatológicos normales, "GOMS" [en línea], disponible en: <http://es.allmetsat.com/satellite-goms.php>. [Consulta del 27/08/2015].
- [18] OSCAR Observing Systems Capability Analysis and Review Tool, "List of Satellites", [en línea], disponible en: <http://www.wmo-sat.info/oscar/satellites>. [Consulta del 29/08/2015].
- [19] «User Guide Building Receive Stations,» [En línea]. Available: [http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/pubs/Users\\_Guide-Building\\_Receive\\_Stations\\_March\\_2009.pdf](http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/pubs/Users_Guide-Building_Receive_Stations_March_2009.pdf). [Último acceso: Agosto 2015].
- [20] EO Edu, "NOAA", [en línea], disponible en: <http://eoedu.belspo.be/en/satellites/noaa.htm>. [Consulta del 27/08/2015].
- [21] NASA – National Aeronautics and Space Administration, "Successful Launch of NOAA-N" [en línea], disponible en: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/noaa-n/main/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/noaa-n/main/index.html). [Consulta del 27/082015].
- [22] NOAA Satellite Information System, "Advanced Very High Resolution Radiometer – AVHRR" [en línea], disponible en: <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>. [Consulta del 27/08/2015].

- [23] "Resolución de las imágenes satélite " ,[en línea], disponible en: [http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/i\\_resolucion.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/i_resolucion.htm). [Consulta del 27/08/2015].
- [24] Teledet, "Resolucion Espacial", [en línea], disponible en: <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/satelites-resolucion-espacial.htm>. [Consulta del 27/08/2015].
- [25] Teledet, "SATÉLITES-RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA", [en línea], disponible en: <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/satelites-resolucion-radiometrica.htm>. [Consulta del 27/08/2015].
- [26] Teledet, "SATELITES-RESOLUCION TEMPORAL", [en línea], disponible en: <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/satelites-resolucion-temporal.htm>. [Consulta del 27/08/2015].
- [27] "Canary Satellite", [en línea], disponible en: [http://www.canarysatellite.com/apt\\_format.html](http://www.canarysatellite.com/apt_format.html). [Consulta del 30/08/2015].
- [28] Scanex Leader in the Field of Satellite Monitoring, "Satellite Specifications ", [en línea], disponible en: <http://www.scanex.ru/en/stations/default.asp?submenu=alice&id=specifications>. [Consulta del 29/08/2015].
- [29] NOAA National Climatic Data Center, "NOAA KLM User`s Guide Section 4.1", [en línea], disponible en: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/html/c4/sec4-1.htm>. [Consulta del 29/08/2015].
- [30] "Telefonía Móvil", Universidad Técnica Federico Santa María Departamento De Electrónica, [en línea], disponible en: <http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/el0322/1s10/project/reports/telefonía4g.pdf>. [Consulta del 29/08/2015].
- [31] I. Pinar Domínguez, J. J. Murillo Fuentes, "Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software", Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones Universidad de Sevilla. Ch. 1, pp. 12, 1ra Edición, 2011..
- [32] Repositorio digital de la Facultad de Ingeniería - UNAM, "Radio Definido por Software", [en línea], disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/894/A4.pdf?sequence=4>. [Consulta del 29/08/2015].
- [33] A. Galvis Quintero, C. A. Ceballos Betancour, and L. De Sanctis Gil, "SDR: La alternativa para la evolución inalámbrica a nivel físico", Universidad Pontificia Bolivariana - Medellín.

- [34] P. B. Kenington. RF and Baseband Techniques for Software Defined Radio. Artech House Publishers. Londres. 2005. 352p..
- [35] "Software Radio Laboratory LLC." [en línea], disponible en: <http://www.srl-llc.com/>. [Consulta del 30 de Agosto del 2015].
- [36] WinRADIO Communications, "WinRADIO" [en línea], disponible en: <http://www.winradio.com/home/g31ddc.htm>. [Consulta del 23/09/2014].
- [37] "FiFi-SDR" [en línea], disponible en: <http://o28.sischa.net/fifisdr/trac>. [Consulta del 23/09/2014].
- [38] Nuand LLC, "bladeRF - the USB 3.0 Superspeed Software Defined Radio" [en línea], disponible en: <http://www.nuand.com/>. [Consulta del 30 de Agosto del 2015].
- [39] Micrisat, "easySDR USB Dongle" [en línea], disponible en: [http://microsat.com.pl/product\\_info.php?products\\_id=35](http://microsat.com.pl/product_info.php?products_id=35). [Consulta del 30 de Agosto del 2015].
- [40] M. Ossmann, "HackRF, an open source SDR platform" [en línea], disponible en: <https://www.kickstarter.com/projects/mossmann/hackrf-an-open-source-sdr-platform>. [Consulta del 30 de Agosto del 2015].
- [41] Ettus Research, "USRP N200/N210 NETWORKED SERIES" [en línea], disponible en: [https://www.ettus.com/content/files/07495\\_Ettus\\_N200-210\\_DS\\_Flyer\\_HR\\_1.pdf](https://www.ettus.com/content/files/07495_Ettus_N200-210_DS_Flyer_HR_1.pdf). [Consulta del 30 de Agosto del 2015].
- [42] Yaesu The Radio, G5500 Operation Manual, "Instruccion Manual G5500", [en línea] disponible en: [http://www.yaesu.co.uk/files/G-5500%20Operating%20Manual\\_a.pdf](http://www.yaesu.co.uk/files/G-5500%20Operating%20Manual_a.pdf). [Consulta del 29/08/2015].
- [43] Tom Doyle Page, "Cheap Rotor Controller", [en línea] disponible en: <http://www.tomdoyle.org/cheaprotorcontroller/CheapRotorController.html>. [Consulta del 29/08/2015].
- [44] R. E. Herrador, "Guia de Usuario de Arduino", Universidad de Cordoba, [en línea] disponible en: [http://www.uco.es/aulasoftwarelibre/wp-content/uploads/2010/05/Arduino\\_user\\_manual\\_es.pdf](http://www.uco.es/aulasoftwarelibre/wp-content/uploads/2010/05/Arduino_user_manual_es.pdf). [Consulta del 28/08/2015].
- [45] Wordpress, "Arduino Nano Pinout Diagram", [en línea] disponible en: <https://bigdanzblog.wordpress.com/2015/01/30/cant-get-i2c-to-work-on-an-arduino-nano-pinout-diagrams/>. [Consulta del 28/08/2015].
- [46] M. S. Pérez, B. G. Iraguen y J. L. F. J. & M. S. Castañer, «Electrónica de Comunicaciones,» 2007, pp. 319-350.



- [47] Experimentar con Satélites, "Satélites meteorológicos", [en línea], disponible en: <http://ea3atl.ure.es/satsmet/satsmete.htm>. [Consulta del 28/08/2015].
- [48] "APT, CHRPT, Meteosat equipment details", [en línea], disponible en: <http://members.inode.at/576265/equipment.html>. [Consulta del 28/08/2015].
- [49] O. A. Ayala Chávez, "Diseño y Simulación de una antena Yagi UDA mediante el uso de algoritmos genéticos para el laboratorio de antenas de la Universidad Técnica Salesiana", Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Abril 2013.
- [50] THIELE, Gary A. Analysis of Yagi Uda Type Antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pp. 24-31. January 1969. Vol. 17. No. 1..
- [51] C. A. Balanis, de "Antenna Theory Analysis and design", John Wiley & Sons, Inc., 2005, p. Cap. 3.
- [52] J. D. Kraus. "Antennas" , ch. 7, McGraw-Hill Book Company 1950..
- [53] «L. J. Celi, N. A. Bustamante, "Diseño, Simulación e Implementación de Antenas con Polarización Circular para las Bandas ISM", Escuela de Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Técnica Particular de Loja, Enero 2011.».
- [54] R. Nery, "Líneas de transmisión", ch. 3..
- [55] H. Nakano, Y. Samada, Y. Yamauchi, "Axial Mode Helical Antennas". Proc. IEEE, vol. AP-34, pp. 1-6, September 1986.
- [56] K. Wong. "Compact and Broadband Microstrip Antennas", ch.5.
- [57] "[TEORIA] Antenas Parabólicas", [en línea], disponible en: <http://www.htforos.com/redes/antenas-parabolicas-t1415.html>. [Consulta del 30/08/2015].
- [58] "WinRadio Satellite Antenna Dish", [en línea], disponible en: <http://www.winradio.com/home/ax400d.htm>. [Consulta del 30/08/2015].
- [59] Ettus Research, "USRP N210", [en línea], disponible en: <https://www.ettus.com/product/details/UN210-KIT>. [Consulta del 30/08/2015].
- [60] Olifantasia, "Products/Prices (USRP, OpenBS kit, accessories)" ,[en línea], disponible en: [http://www.olifantasia.com/gnuradio/usrp/files/usrp\\_n210.JPG](http://www.olifantasia.com/gnuradio/usrp/files/usrp_n210.JPG) [Consulta del 30/08/2015].
- [61] J. P Tene Castillo "Diseño e implementación de un Sistema de Conmutación de red para un sistema GSM basado en OpenBTS y Asterisk", Escuela de Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Técnica Particular de Loja, Septiembre 2013.

- [62] V. Rodríguez, J. Sánchez, "Empowering software radio: It++ as a gnu radio out-of-tree implementation", Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina), vol. 12, pp. 269276, March 2014.
- [63] D. Tucker and G. Tagliarini, "Prototyping with gnu radio and the usrp – where to begin", in Southeastcon, 2009. SOUTHEASTCON '09. IEEE, pp. 50-54, March 2009.
- [64] GNU Radio, "Capitulo 2", ch. 2, pp. 17. [en línea]. disponible en: [https://gnuradio.org/redmine/attachments/download/93/Capitulo\\_2.pdf](https://gnuradio.org/redmine/attachments/download/93/Capitulo_2.pdf). [Consulta del 27/08/2015].
- [65] M. Peralta, A. Sócola, "Desarrollo de sistemas de comunicaciones usando tecnología libre de Radio Definida mediante Software", Escuela de Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Técnica Particular de Loja, Trabajo de Fin de Titulación, pp. 20-21(2014).
- [66] GNURadio, Repositorio, gnuradio, gr-noaa, examples, "usrp\_rx\_hrpt.grc", [en línea], disponible en: <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/repository/revisions/350726ae56d46d2c7c1adf71b7049369a428d455/show/gr-noaa/examples>. [Consulta del 29/08/2015].
- [67] D. Taylor, "HRPT Reader", [en línea] disponible en: <http://www.satsignal.eu/software/hrpt.htm>..
- [68] WiNRADiO, "Weather Satellite Receiving Systems", [en línea], disponible en: <http://www.winradio.com/home/wss-420.htm>. [Consulta del 30/08/2015].
- [69] DartCom Weather Satellite and Remote Sensing Ground Stations, "HRPT/AHRPT System", [en línea], disponible en: <http://www.dartcom.co.uk/products/hrpt-ahrpt-system/overview>. [Consulta del 30/08/2015]..
- [70] Quorum Communications, "HRPT Data Capture Engine", [en línea], disponible en: <http://www.qcom.com/datasheets/HRPTinst.pdf>. [Consulta del 30/08/2015].
- [71] QUORUM Communications, "Price List", [en línea], disponible en: <http://www.qcom.com/datasheets/prices.pdf> [Consulta del 30/08/2015]..
- [72] MORCOM International Inc. Critical Wireless Communications and Weather Information Systems, "NOAA HRPT Satellite Receiving System", [en línea], disponible en: [http://www.morcom.com/satellite\\_imaging.html](http://www.morcom.com/satellite_imaging.html). [Consulta del 30/08/2015]..
- [73] TimeStep, "Timestep Professional (C) HRPT AVHRR Systems", [en línea], disponible en: [http://www.timestep.com/timestep\\_pdf/HRPT%20Prof%20Sales%20BIG%20NP.pdf](http://www.timestep.com/timestep_pdf/HRPT%20Prof%20Sales%20BIG%20NP.pdf). [Consulta del 30/08/2015]..

[74] TimeStep, "Timestep Professional (C) HRPT AVHRR Systems Price", [en linea], disponible en: [http://www.time-step.com/products\\_pro\\_hrpt.htm](http://www.time-step.com/products_pro_hrpt.htm). [Consulta del 30/08/2015]..

## **ANEXOS**

**ANEXO A**  
**INSTALACIÓN DEL DRIVER UHD**

El primer paso para la instalación del *software* GNURADIO es el de instalar el *driver* que permitirá el manejo del equipo USRP modelo N210 de la marca ETTUS Research.

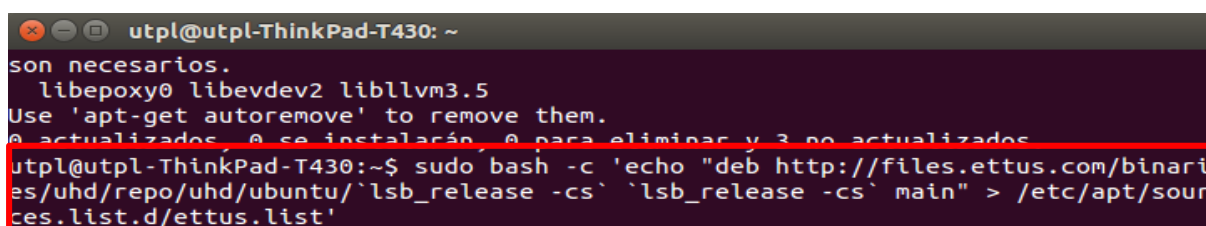
El *software* del *driver* USRP *Hardware* UHD es el controlador de *hardware* para todos los dispositivos USRP. Funciona en todas las plataformas (Linux, Windows y Mac) y se puede construir con GCC, compiladores Clang y MSVC<sup>12</sup>.

Para habilitación del *hardware* e interfaz de comunicación entre el *software* y *hardware* que se utilizará en el actual trabajo de titulación, es necesario instalar el USRP *Hard Drive* UHD el cual consta de librerías que permiten su manejo.

### A.1. Instalación de librerías con Apt

Para instalar el *software* de UHD y para permitir recibir actualizaciones de paquetes se debe ejecutar los siguientes comandos (figura A.1 y figura A.2) en una terminal de Ubuntu:

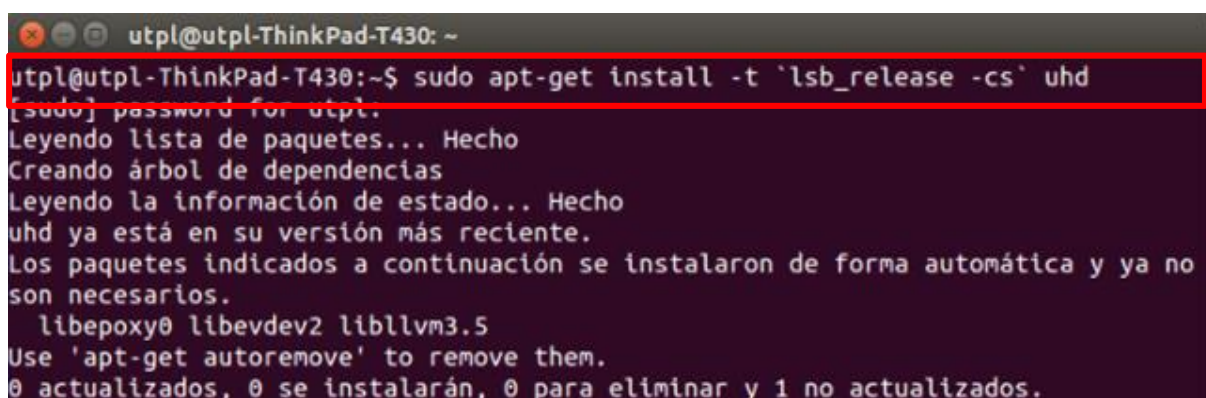
```
sudo bash -c 'echo "deb http://files.ettus.com/binaries/uhd/repo/uhd/ubuntu/`lsb_release -cs` `lsb_release -cs` main" > /etc/apt/sources.list.d/ettus.list'
```



```
utpl@utpl-ThinkPad-T430: ~  
son necesarios.  
libepoxy0 libevdev2 libllvm3.5  
Use 'apt-get autoremove' to remove them.  
0 actualizados, 0 se instalarán, 0 para eliminar y 3 no actualizados  
utpl@utpl-ThinkPad-T430:~$ sudo bash -c 'echo "deb http://files.ettus.com/binaries/uhd/repo/uhd/ubuntu/`lsb_release -cs` `lsb_release -cs` main" > /etc/apt/sources.list.d/ettus.list'
```

Figura A.1.- Comando para actualización de paquetes.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

```
$ sudo apt-get install -t `lsb_release -cs` uhd
```



```
utpl@utpl-ThinkPad-T430: ~  
utpl@utpl-ThinkPad-T430:~$ sudo apt-get install -t `lsb_release -cs` uhd  
[sudo] password for utpl:  
Leyendo lista de paquetes... Hecho  
Creando árbol de dependencias  
Leyendo la información de estado... Hecho  
uhd ya está en su versión más reciente.  
Los paquetes indicados a continuación se instalaron de forma automática y ya no son necesarios.  
libepoxy0 libevdev2 libllvm3.5  
Use 'apt-get autoremove' to remove them.  
0 actualizados, 0 se instalarán, 0 para eliminar y 1 no actualizados.
```

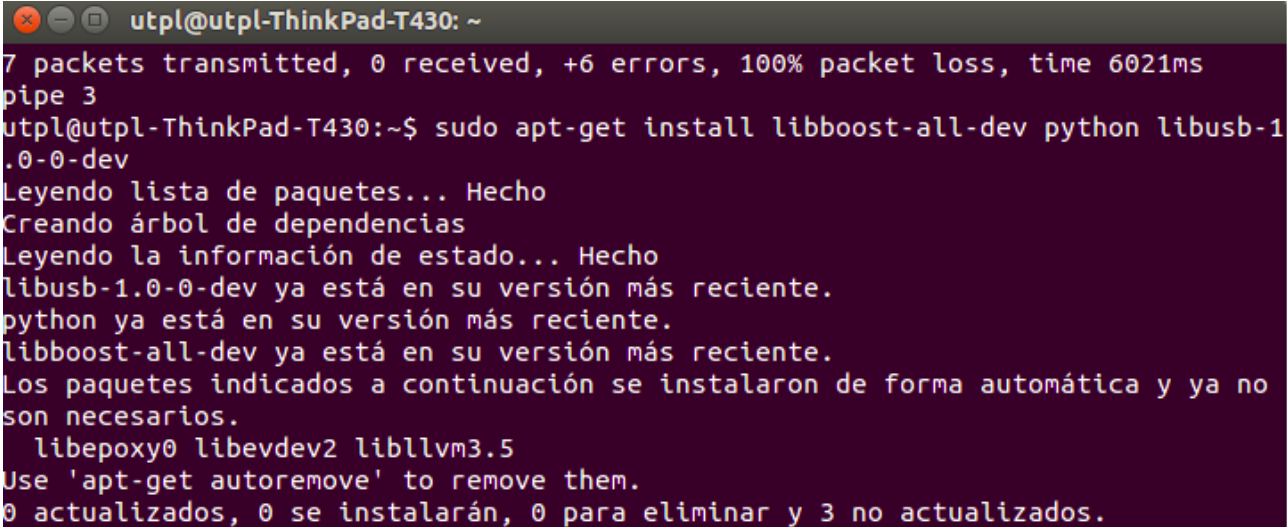
Figura A.2.- Instalación de paquetes UHD  
Fuente: Imagen propia de los autores.

### A.2. Configuración de librerías

<sup>12</sup> Microsoft Visual C++

GNURadio proporciona binarios independientes para todas las plataformas soportadas. Se ejecuta una terminal de Ubuntu, una vez en el terminal ingresamos con permisos de administrador para poder instalar las dependencias de tiempo de ejecución y luego ingresamos el siguiente comando (figura A.3):

```
sudo apt-get install python libboost-all-dev libusb-1.0-0-dev
```



```
utpl@utpl-ThinkPad-T430: ~  
7 packets transmitted, 0 received, +6 errors, 100% packet loss, time 6021ms  
pipe 3  
utpl@utpl-ThinkPad-T430:~$ sudo apt-get install libboost-all-dev python libusb-1  
.0-0-dev  
Leyendo lista de paquetes... Hecho  
Creando árbol de dependencias  
Leyendo la información de estado... Hecho  
libusb-1.0-0-dev ya está en su versión más reciente.  
python ya está en su versión más reciente.  
libboost-all-dev ya está en su versión más reciente.  
Los paquetes indicados a continuación se instalaron de forma automática y ya no  
son necesarios.  
  libepoxy0 libevdev2 libllvm3.5  
Use 'apt-get autoremove' to remove them.  
0 actualizados, 0 se instalarán, 0 para eliminar y 3 no actualizados.
```

Figura A.3.- Uso del comando para instalar dependencias.

Fuente: Imagen propia de los autores.

Luego usamos el siguiente comando seguido de un enter:

```
# sudo apt-get install libboost-all-dev libusb-1.0-0-dev python-cheetah doxygen python-  
docutils
```

El cual instalara las librerías necesarias para configurar y compilar los archivos del paquete UHD.

### A.3. Configuración del controlador

Una vez instalado las librerías del *driver* UHD se descargan los archivos de configuración del *driver* UHD disponibles en la siguiente página:

<https://github.com/EttusResearch/UHD/tags>

En esta página se encontraran varias versiones del *software* a descargar en formato .tar.gz, se debe escoger la versión más acorde a nuestras necesidades, para la configuración en este

caso se utilizó la versión UHD-3.5.1 (UHD-Mirror-release\_003\_005\_001). Una vez descargado se tendrá un archivo en formato *tar.gz*, luego nuevamente se abre el terminal de Ubuntu, se redirige a la carpeta que contiene el archivo descargado, luego ejecutamos los siguientes comandos:

```
$ ls
$ cd <Nombre del directorio>
$ tar -xvzf <Nombre del archivo.tar.gz>
$ cd host
$ mkdir build
$ cd build
$ cmake ../
$ make && make test
$ sudo make install
$ sudo ldconfig
```

Con el comando “*ls*” se puede observar el contenido del directorio en el que nos encontramos, con “*cd <Nombre del directorio>*” nos dirigimos a la carpeta donde se descargó el archivo, con el comando “*tar -xvzf <Nombre del archivo.tar.gz>*” podemos descomprimir el archivo en una carpeta del mismo nombre, luego ingresamos en la carpeta descomprimida a través del terminal nuevamente con el comando “*cd <Nombre del directorio>*”, una vez aquí escribimos el comando “*cd host*” que permite dar atributos de usuario a esta carpeta para luego con ayuda de “*mkdir*” crear un directorio llamado “*build*”, una vez creado y ya en este directorio se puede ejecutar el programa con el comando “*cmake*”.

Para ejecutar las librerías compartidas en el directorio de instalación en la línea de comandos para poder llamarlas con ayuda de una ruta de comandos de un terminal, debemos utilizar el comando “*ldconfig*”, el cual, creara los vínculos en memoria cache.



**ANEXO B**  
**INSTALACIÓN DE GNURADIO**

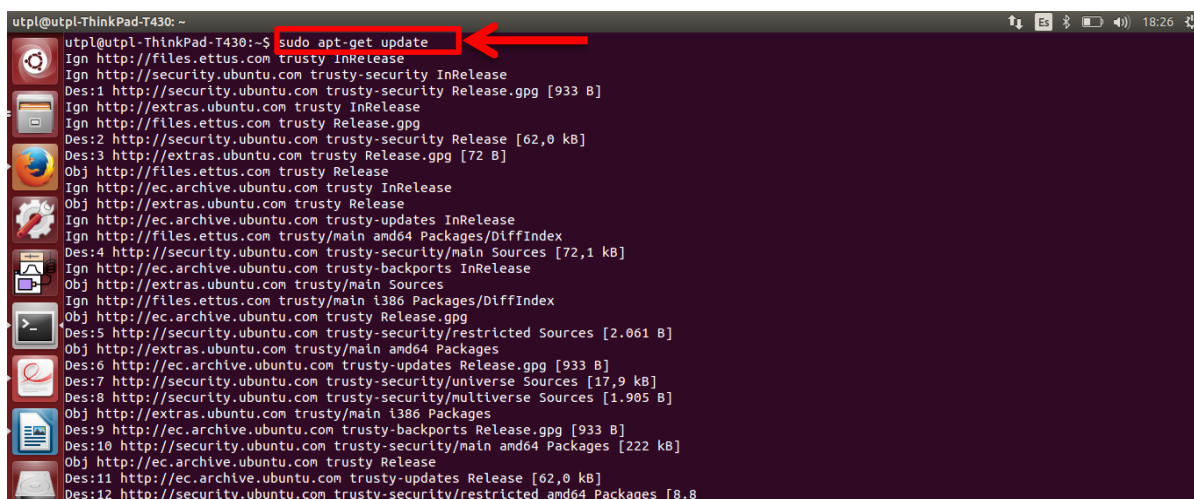
## B.1. Instalación de pre-requisitos

Para una correcta instalación de GNURadio se debe iniciar con la instalación de los pre-requisitos la instalación de los pre-requisitos se debe hacer de manera correcta, debido a que si uno de estos procesos falla durante su instalación el sistema no va a funcionar.

El *software* de GNURadio se ha instalado en el sistema operativo de Ubuntu, en su versión 14.02.2 LTS.

Una vez instalado el sistema operativo de Ubuntu, para realizar una actualización de los repositorios y de todos los paquetes, dentro de un terminal se debe ingresar el siguiente comando, tal como se ve en la figura B.1.

`$ sudo apt-get update`



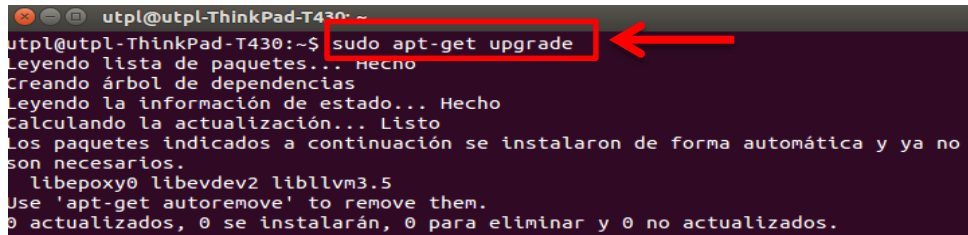
```
utpl@utpl-ThinkPad-T430: ~  
utpl@utpl-ThinkPad-T430:~$ sudo apt-get update  
Ign http://files.ettus.com trusty InRelease  
Ign http://security.ubuntu.com trusty-security InRelease  
Des:1 http://security.ubuntu.com trusty-security Release.gpg [933 B]  
Ign http://extras.ubuntu.com trusty InRelease  
Ign http://files.ettus.com trusty Release.gpg  
Des:2 http://security.ubuntu.com trusty-security Release [62,0 kB]  
Des:3 http://extras.ubuntu.com trusty Release.gpg [72 B]  
Obj http://files.ettus.com trusty Release  
Ign http://ec.archive.ubuntu.com trusty InRelease  
Obj http://extras.ubuntu.com trusty Release  
Ign http://ec.archive.ubuntu.com trusty-updates InRelease  
Ign http://files.ettus.com trusty/main amd64 Packages/DiffIndex  
Des:4 http://security.ubuntu.com trusty-security/main Sources [72,1 kB]  
Ign http://ec.archive.ubuntu.com trusty-backports InRelease  
Obj http://extras.ubuntu.com trusty/main Sources  
Ign http://files.ettus.com trusty/main i386 Packages/DiffIndex  
Obj http://ec.archive.ubuntu.com trusty Release.gpg  
Des:5 http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted Sources [2.061 B]  
Obj http://extras.ubuntu.com trusty/main amd64 Packages  
Des:6 http://ec.archive.ubuntu.com trusty-updates Release.gpg [933 B]  
Des:7 http://security.ubuntu.com trusty-security/universe Sources [17,9 kB]  
Des:8 http://security.ubuntu.com trusty-security/multiverse Sources [1.905 B]  
Obj http://extras.ubuntu.com trusty/main i386 Packages  
Des:9 http://ec.archive.ubuntu.com trusty-backports Release.gpg [933 B]  
Des:10 http://security.ubuntu.com trusty-security/main amd64 Packages [222 kB]  
Obj http://ec.archive.ubuntu.com trusty Release  
Des:11 http://ec.archive.ubuntu.com trusty-updates Release [62,0 kB]  
Des:12 http://security.ubuntu.com trusty-security/restricted amd64 Packages [8.8
```

Figura B.1.- Uso del comando update para actualización de repositorios.

Fuente: Imagen propia de los autores.

Para realizar una actualización del sistema con todas las posibles actualizaciones que pudiesen existir se debe usar el siguiente comando tal como lo muestra la figura B.2.

`$ sudo apt-get upgrade`



```
utpl@utpl-ThinkPad-T430:~$ sudo apt-get upgrade
Leyendo lista de paquetes... Hecho
Creando árbol de dependencias
Leyendo la información de estado... Hecho
Calculando la actualización... Listo
Los paquetes indicados a continuación se instalaron de forma automática y ya no
son necesarios.
 libepoxy0 libevdev2 libllvm3.5
Use 'apt-get autoremove' to remove them.
0 actualizados, 0 se instalarán, 0 para eliminar y 0 no actualizados.
```

Figura B.2.- Uso del comando sudo apt-get upgrade

Fuente: Imagen propia de los autores.

## B.2. Instalación de GNURadio

La forma recomendada para instalar la radio GNU es a través del paquete GNURadio desde los repositorios estándar de su distribución disponibles en la página *web* de GNURadio<sup>13</sup>. El desarrollo de GNURadio es crece a un ritmo extremadamente rápido, y los binarios proporcionados por su distribución en uso pueden quedar obsoletos en poco tiempo. Antes de la instalación se debe comprobar si la versión que está instalando se encuentra actualizada.

Existen dos formas de instalar GNURadio *Companion*:

### B.2.1 Primera Forma

Archivos binarios pre-compilados vienen empaquetados con cada distribución de GNURadio. Para la instalación de GNURadio desde binarios solo se debe ejecutar el siguiente comando:

```
$ apt-get install gnuradio
```

Para instalar nuevas versiones o cuando se cuenta con diferentes plataformas, se debe consultar la guía que viene incluida en los paquetes binarios.

### B.2.2 Segunda Forma

Se procede a descargar el archivo *script* disponible en la página web de GNURadio como se observa en la figura B.3, este *script* contiene el código fuente.

<sup>13</sup> <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki/InstallingGR>

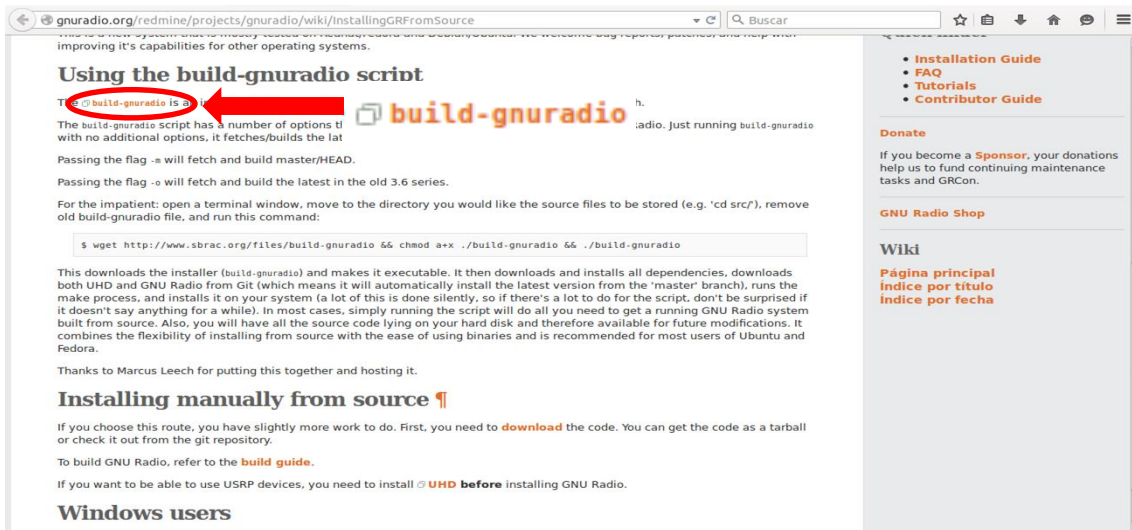


Figura B.3.- Ubicación del *script* disponible en la web de GNURadio  
Fuente: Imagen propia de los autores.

El *script* descargado se guardado en un documento de texto (.txt), la instalación desde el *script* nos permite la instalación completa de cada uno de los pre-requisitos necesarios.

El *script* GNURadio al descargarlo presenta una serie de opciones que podemos utilizar para instalar.

Una vez descargado el *script* de GNURadio en formato de texto, se procede a darles los permisos de lectura y escritura para poder ejecutarlo, esto se lo realiza de la siguiente manera:

1. Se ejecuta una terminal de comandos en Ubuntu.
2. Se dirige a la carpeta de destino en donde se descargó el *script*, para visualizar el contenido de la carpeta actual se utiliza el comando "ls".
3. Una vez ubicado el *script* descargado se procede a darle permisos de lectura y escritura para poder ejecutarlo, por medio del siguiente comando:

```
chmod a+x build-gnuradio
```

```
utpl@utpl-ThinkPad-T430:~$ chmod a+x build-gnuradio
utpl@utpl-ThinkPad-T430:~$ ls
atrspy          build-gnuradio.4  Descargas      Imágenes      uhd
bladeRF         build-gnuradio.5  Documentos     Música        Videos
build-gnuradio build-gnuradio.6  Escritorio     Música        Videos
build-gnuradio.1 build-gnuradio.7  examples.desktop Público       tmp8199
build-gnuradio.2 build-gnuradio.8  gnuradio      touch3072
build-gnuradio.3 deja-dup          hackrf
utpl@utpl-ThinkPad-T430:~$
```

Figura B.4.- *Script* ejecutado.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

Se puede observar el uso del comando anterior en la figura B.4.

4. Una vez hecho ejecutable el *script* descargado se lo compila por medio del siguiente comando:

```
./build-gnuradio
```

```
utpl@utpl-ThinkPad-T430: ~
utpl@utpl-ThinkPad-T430:~$ ./build-gnuradio
This script will install Gnu Radio from current GIT sources
You will require Internet access from the computer on which this
script runs. You will also require SUDO access. You will require
approximately 500MB of free disk space to perform the build.

This script will, as a side-effect, remove any existing Gnu Radio
installation that was installed from your Linux distribution packages.
It must do this to prevent problems due to interference between
a linux-distribution-installed Gnu Radio/UHD and one installed from GIT
source.

The whole process may take up to two hours to complete, depending on the
capabilities of your system.
```

Figura B.5.- Comando para ejecución del *software*.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

Con la ejecución de este comando empieza la instalación de GNURadio; este *script* realiza una verificación de todos los pre-requisitos necesarios en el computador para su instalación (figura B.5).

Con tan solo sólo correr el *script* se obtiene la última versión de GNURadio *Companion*.

Una forma rápida de hacer lo mencionado anteriormente es la ejecución en una terminal del siguiente comando:

```
$ Wget http://www.sbrac.org/files/build-gnuradio && chmod a + x ./build-gnuradio
&& ./build gnuradio
```

Con este comando se descarga el *script* y el archivo descargado se vuelve ejecutable. A continuación, descarga e instala todas las dependencias, descarga tanto UHD y

GNURadio de Git.

En la mayoría de casos, basta con ejecutar el *script* hará todo lo necesario para conseguir un sistema GNURadio corriendo compilado. Además, usted tendrá todo el código fuente del *software* descargado en su disco duro y por lo tanto disponible para futuras modificaciones.

### **B.3. Verificación de la instalación de GNURadio *Companion***

Para verificar si se instaló de manera correcta el *software* de GNURadio se debe abrir el entorno grafico del programa o se debe ejecutar un archivo de extensión .py localizado en la carpeta de "*examples*" de la carpeta en donde se instaló GNURadio, si todo está instalado de forma correcta el programa abrirá el archivo .py sin ningún problema, caso contrario emitirá un error; en caso de presentarse error se debe analizar los pasos vistos anteriormente.

**ANEXO C**  
**CÁLCULO DEL ENLACE SATELITAL**

### C.1. Parámetros del enlace

- ✓ Potencia Isotrópica Radiada equivalente (PIRE) = 40,13 dBm o 38,03 dBm
- ✓ Potencia de Transmisión del satélite = 6,35 W  $\approx$  38,03 dBm
- ✓ Polarización de la antena del satélite = RHCP
- ✓ Piso de ruido = -110 dBm

### C.2. Cálculos del enlace

- ✓ **Perdidas del enlace por Espacio Libre**

$$L_{bf} (dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32,44$$

Dónde:

$d$  = Distancia (km)

$f$  = Frecuencia (MHz)

Entonces las pérdidas por espacio libre serán:

$$L_{bf} (dB) = 20 \log_{10}(2.000) + 20 \log_{10}(1.700) + 32,44$$

$$L_{bf} (dB) = 163,06 \text{ dB}$$

Las pérdidas de enlace en el vacío serán de 163,06 dB

- ✓ **Relación Señal/Ruido**

$$SNR = PIRE + L_{bf}$$

$$SNR = 40,13 \text{ dBm} - 163,06 \text{ dB}$$

$$SNR = -122,93 \text{ dB}$$



✓ **Nivel de señal decodificable**

$$SNR - \text{Piso de Ruido} = -122,93 \text{ dB} + 110 \text{ dBm}$$

$$SNR - \text{Piso de Ruido} = -12,93 \text{ dB}$$

Para que una señal sea codificable se requiere que el nivel de la señal sea por lo menos de 10 dB, entonces:

$$-12,93 \text{ dB} - 10 \text{ dB} = -22,93 \text{ dB}$$

Se necesita que la ganancia de la antena receptora sea mayor a 22,93 dB para poder captar la señal digital HRPT del satélite NOAA.

**ANEXO D**  
**CODIGO EN ARDUINO PARA EL SEGUIMIENTO AUTOMATICO DE SATÉLITES**

/\*

#Conexiones: [DIN-8 PIN]

G-5500 analog azimuth to Arduino pin A0	[pin 6, verde/blanco]
G-5500 analog elevation to Arduino pin A1	[pin 1, café/blanco]
G-5500 elevation rotor up to Arduino pin 8	[pin 5, café]
G-5500 elevation rotor down to Arduino pin 9	[pin 3, azul/blanco]
G-5500 azimuth rotor left to Arduino pin 10	[pin 4, naranja]
G-5500 azimuth rotor right to Arduino pin 11	[pin 2, naranja/blanco]
	[pin 8, verde] => GROUND

\*/

```
#if defined(ARDUINO) && ARDUINO >= 100
```

```
#include "Arduino.h"
```

```
#else
```

```
#include "WProgram.h"
```

```
#endif
```

```
#include <SoftwareSerial.h> // Usar la librería UART
```

/\*

Los convertidores A / D de 10 bits en el Arduino tienen un valor máximo de 1023.

Para el azimut el valor A/D de 1023 corresponde a 450 grados

Para la elevación del valor A / D de 1023 corresponde a 180 grados

Para determinar este valor de escala, se aconseja multiplicar por 100 para mantener la precisión por lo que:

El factor de escala debe ser  $100 * (1023/450)$  para el acimut

El factor de escala debe ser de  $100 * (1023/180)$  para la elevación

\*/

```
const long _azScaleFactor = 275; // debería ser 227, pero en las pruebas se obtiene  
// mayor precision con 275
```

```
const long _elScaleFactor = 568; // Ambos valores son ajustables
```

```
// LCD
```

```
const byte _backLightOn = 0x11; // lcd back light on
```

```
const byte _cursorOff = 0x16; // lcd cursor off
```

```
const byte _clearScreen = 0x0C; // lcd clear screen
```

```
const byte _line0 = 0x80; // lcd line 0 - top line
```

```
const byte _line1 = 0x94; // lcd line 1 - bottom line
```

```
// Pines
```

```
const byte _azimuthInputPin = A0; // azimuth analog signal from G5500
```

```
const byte _elevationInputPin = A1; // elevation analog signal from G5500
```

```
const byte _G5500UpPin = 8; // elevation rotor up control line
```

```
const byte _G5500DownPin = 9; // elevation rotor down control line
```

```
const byte _G5500LeftPin = 10; // azimuth rotor left control line
```

```
const byte _G5500RightPin = 11; // azimuth rotor right control line
```

```
const byte _LcdTxPin = 7; // software uart lcd tx pin
```

```
const byte _LcdRxPin = 6; // software uart lcd rx pin - [pin no usado]
```

```
long _closeEnough = 100; // tolerance for az-el match in rotor move in degrees * 100
```

```
// Rotor
```

```
const long _maxRotorAzimuth = 45000L; // Máximo azimuth en grados * 100
```

```
const long _maxRotorElevation = 18000L; // Máxima elevación en grados * 100
```

```

long _rotorAzimuth = 0L; // current rotor azimuth in degrees * 100
long _rotorElevation = 0L; // current rotor azimuth in degrees * 100
long _azimuthTemp = 0L; // used for gs232 azimuth decoding
long _elevationTemp = 0L; // used for gs232 elevation decoding
long _newAzimuth = 0L; // new azimuth for rotor move
long _newElevation = 0L; // new elevation for rotor move
long _previousRotorAzimuth = 0L; // previous rotor azimuth in degrees * 100
long _previousRotorElevation = 0L; // previous rotor azimuth in degrees * 100

unsigned long _rtcLastDisplayUpdate = 0UL; // rtc at start of last loop
unsigned long _rtcLastRotorUpdate = 0UL; // rtc at start of last loop
unsigned long _displayUpdateInterval = 500UL; // display update interval in mS
unsigned long _rotorMoveUpdateInterval = 100UL; // rotor move check interval in mS

boolean _gs232WActice = false; // gs232 W command in process
int _gs232AzElIndex = 0; // position in gs232 Az El sequence
long _gs232Azimuth = 0; // gs232 Azimuth value
long _gs232Elevation = 0; // gs232 Elevation value
boolean _azimuthMove = false; // azimuth move needed
boolean _elevationMove = false; // elevation move needed

String azRotorMovement; // string for az rotor move display
String elRotorMovement; // string for el rotor move display

SoftwareSerial lcdSerial = SoftwareSerial(_LcdRxBPin, _LcdTxPin);

void setup()
{
  // inicializar pines de control del rotor como salidas
  pinMode(_G5500UpPin, OUTPUT);
  pinMode(_G5500DownPin, OUTPUT);
  pinMode(_G5500LeftPin, OUTPUT);
  pinMode(_G5500RightPin, OUTPUT);
  // establecer todas las salidas de control del rotor en bajo
  digitalWrite(_G5500UpPin, LOW);
  digitalWrite(_G5500DownPin, LOW);
  digitalWrite(_G5500LeftPin, LOW);
  digitalWrite(_G5500RightPin, LOW);

  // inicializar puertos seriales:
  Serial.begin(9600);

  // Inicializar software UART utilizado para la visualización LCD
  pinMode(_LcdTxPin, OUTPUT);
  lcdSerial.begin(9600);

  // inicializar la pantalla LCD
  lcdSerial.write(_backLightOn); // backlight on
  lcdSerial.write(_cursorOff); // cursor off
  lcdSerial.write(_clearScreen); // clear screen
  delay(200); // wait for clear screen

  lcdSerial.println("YAESU CONTROL"); //mensaje de inicio
  delay(2000);
  lcdSerial.write(_clearScreen); // clear screen

  // Lectura de valores para mosrar en la LCD
  readAzimuth(); // obtiene el azimut actual del rotor
  _previousRotorAzimuth = _rotorAzimuth + 1000;

```

```

    readElevation(); // obtiene elevación actual del rotor
    _previousRotorElevation = _rotorElevation + 1000;
}
// Progama principal

void loop()
{
    if (Serial.available() > 0)
    {
        decodeGS232(Serial.read());
    }
    unsigned long rtcCurrent = millis(); // get current rtc value

    // check for rtc overflow - skip this cycle if overflow
    if (rtcCurrent > _rtcLastDisplayUpdate) // overflow if not true
    _rotorMoveUpdateInterval
    {
        // actualizar movimiento del rotor si es necesario
        if (rtcCurrent - _rtcLastRotorUpdate > _rotorMoveUpdateInterval)
        {
            _rtcLastRotorUpdate = rtcCurrent; // reset rotor move timer base
        }
    }

    // AZIMUTH

    readAzimuth(); // Lectura de azimuth actual del rotor

    if ( (abs(_rotorAzimuth - _newAzimuth) > _closeEnough) && _azimuthMove )
    {
        updateAzimuthMove();
    }
    else // Si no se requiere movimiento, "apaga" el rotor en azimuth
    {
        digitalWrite(_G5500LeftPin, LOW);
        digitalWrite(_G5500RightPin, LOW);
        _azimuthMove = false;
        azRotorMovement = " ";
    }

    // ELEVACIÓN

    readElevation(); // Lectura de elevación actual del rotor

    if ( abs(_rotorElevation - _newElevation) > _closeEnough && _elevationMove ) // move
required
    {
        updateElevationMove();
    }
    else // Si no se requiere movimiento, "apaga" el rotor en elevación
    {
        digitalWrite(_G5500UpPin, LOW);
        digitalWrite(_G5500DownPin, LOW);
        _elevationMove = false;
        elRotorMovement = " ";
    }
}
// Actualizar display

if (rtcCurrent - _rtcLastDisplayUpdate > _displayUpdateInterval)
{

```

```

    // update rtcLast
    _rtcLastDisplayUpdate = rtcCurrent;
    displayAzEl(_rotorAzimuth, _rotorElevation);
}
}
else
{
    // update rtcLast
    _rtcLastDisplayUpdate = rtcCurrent;
}
}

// Actualizar movimiento del rotor en elevación

void updateElevationMove()
{
    long rotorMoveEI = _newElevation - _rotorElevation;
    if (rotorMoveEI > 9000)
    {
        rotorMoveEI = rotorMoveEI - 9000;
    }
    else
    {
        if (rotorMoveEI < -9000)
        {
            rotorMoveEI = rotorMoveEI + 9000;
        }
    }
    if (rotorMoveEI > 0)
    {
        elRotorMovement = " U "; // Up: Indica cuantos grados de mover hacia arriba "
        elRotorMovement = elRotorMovement + String(_newElevation / 100);
        digitalWrite(_G5500DownPin, LOW);
        digitalWrite(_G5500UpPin, HIGH);
    }
    else
    {
        if (rotorMoveEI < 0)
        {
            elRotorMovement = " D "; // Down: Indica cuantos grados de mover hacia abajo "
            elRotorMovement = elRotorMovement + String(_newElevation / 100);
            digitalWrite(_G5500UpPin, LOW);
            digitalWrite(_G5500DownPin, HIGH);
        }
    }
}
}

```

// Actualizar el movimiento del rotor en azimut

```

void updateAzimuthMove()
{
    long rotorMoveAz = _newAzimuth - _rotorAzimuth;
    if (rotorMoveAz > 18000)
    {
        rotorMoveAz = rotorMoveAz - 180;
    }
    else
    {
        if (rotorMoveAz < -18000)

```

```

    {
        rotorMoveAz = rotorMoveAz + 18000;
    }
}
if (rotorMoveAz > 0)
{
    azRotorMovement = " R "; // Right: Indica cuantos grados de mover hacia la derecha
    azRotorMovement = azRotorMovement + String(_newAzimuth / 100);
    digitalWrite(_G5500LeftPin, LOW);
    digitalWrite(_G5500RightPin, HIGH);
}
else
{
    if (rotorMoveAz < 0)
    {
        azRotorMovement = " L "; // Left: Indica cuantos grados de mover hacia la izquierda
        azRotorMovement = azRotorMovement + String(_newAzimuth / 100);
        digitalWrite(_G5500RightPin, LOW);
        digitalWrite(_G5500LeftPin, HIGH);
    }
}
}

```

// Leer ezimut y elevación actual del controlador del rotor yaesu G5500

```

void readElevation()
{
    long sensorValue = analogRead(_elevationInputPin);
    _rotorElevation = ((sensorValue * 10000) / _elScaleFactor) - _elAdZeroOffset;
}
void readAzimuth()
{
    long sensorValue = analogRead(_azimuthInputPin);
    _rotorAzimuth = ((sensorValue * 10000) / _azScaleFactor) - _azAdZeroOffset;
}

```

// decode gs232 commands

```

void decodeGS232(char character)
{
    switch (character)
    {
        case 'w': // gs232 W command
        case 'W':
        {
            {
                _gs232WActice = true;
                _gs232AzEIIindex = 0;
            }
            break;
        }
    }

    // numeric - azimuth and elevation digits

    case '0': case '1': case '2': case '3': case '4':
    case '5': case '6': case '7': case '8': case '9':

    {
        if (_gs232WActice)

```

```

    {
        processAzEINumeric(character);
    }
}
    default:
    {
    }
}
}

// process az el numeric characters from gs232 W command

void processAzEINumeric(char character)
{
    switch(_gs232AzEIIIndex)
    {
        case 0: // first azimuth character
        {
            _azimuthTemp =(character - 48) * 100;
            _gs232AzEIIIndex++;
            break;
        }

        case 1:
        {
            _azimuthTemp = _azimuthTemp + (character - 48) * 10;
            _gs232AzEIIIndex++;
            break;
        }

        case 2: // final azimuth character
        {
            _azimuthTemp = _azimuthTemp + (character - 48);
            _gs232AzEIIIndex++;

            // check for valid azimuth
            if ((_azimuthTemp * 100) > _maxRotorAzimuth)
            {
                _gs232WActice = false;
                _newAzimuth = 0L;
                _newElevation = 0L;
            }
            break;
        }

        case 3: // first elevation character
        {
            _elevationTemp =(character - 48) * 100;
            _gs232AzEIIIndex++;
            break;
        }

        case 4:
        {
            _elevationTemp = _elevationTemp + (character - 48) * 10;
            _gs232AzEIIIndex++;
            break;
        }
    }
}

```



```

    case 5: // last elevation character
    {
        _elevationTemp = _elevationTemp + (character - 48);
        _gs232AzElIndex++;

        // check for valid elevation
        if ((_elevationTemp * 100) > _maxRotorElevation)
        {
            _gs232WActice = false;
            _newAzimuth = 0L;
            _newElevation = 0L;
        }
        else // both azimuth and elevation are ok
        {
            // set up for rotor move
            _newAzimuth = _azimuthTemp * 100;
            _newElevation = _elevationTemp * 100;
            _azimuthMove = true;
            _elevationMove = true;
        }
        break;
    }

    default:
    {
        // should never get here
    }
}
}

```

// Mostrar azimut y elevación en la LCD

```

void displayAzEl(long az, long el)
{
    // display azimuth - filter A/D noise
    if (abs(_rotorAzimuth - _previousRotorAzimuth) > 50)
    {
        _previousRotorAzimuth = _rotorAzimuth;
        displayAz(az);
    }

    // display elevation - filter A/D noise
    if (abs(_rotorElevation - _previousRotorElevation) > 50)
    {
        _previousRotorElevation = _rotorElevation;
        displayEl(el);
    }
}

```

```

void displayEl(long el)
{
    // clear elevation line lcdSerial
    lcdSerial.write(_line1);
    lcdSerial.print(" ");

    // adjust value for display
    double elFloat = el;
    elFloat = elFloat / 100.0;
}

```

```

// position lcd cursor on bottom line
lcdSerial.write(_line1);

// display elevation
lcdSerial.print("EL ");
// pad with spaces
if (elFloat < 10.0)
{
  lcdSerial.print(" ");
}
if (elFloat < 100.0)
{
  lcdSerial.print(" ");
}
lcdSerial.print(elFloat, 1);
lcdSerial.print(elRotorMovement);
}

void displayAz(long az)
{
  // clear azimuth line
  lcdSerial.write(_line0);
  lcdSerial.print("          ");

  // adjust value for display
  double azFloat = az;
  azFloat = azFloat / 100.0;

  // position lcd cursor on top line
  lcdSerial.write(_line0);

  // display azimuth
  lcdSerial.print("AZ ");
  // pad with spaces

  if (azFloat < 10.0)
  {
    lcdSerial.print(" ");
  }
  if (azFloat < 100.0)
  {
    lcdSerial.print(" ");
  }
  lcdSerial.print(azFloat, 1);
  lcdSerial.print(azRotorMovement);
}

```

Código basado en: “Cheap Rotor Controller” [43] disponible en:  
<http://www.tomdoyle.org/cheaprotorcontroller/CheapRotorController.html>

**ANEXO E**  
**CONFIGURACIÓN DE SatPC32 Y SERVER SDX**

## E.1. Configuración SatPC32.

En la parte superior abrir el menú “*Setup*” para seleccionar en una lista la interfaz o el controlador que se vamos a utilizar como se ve en la figura E.1.

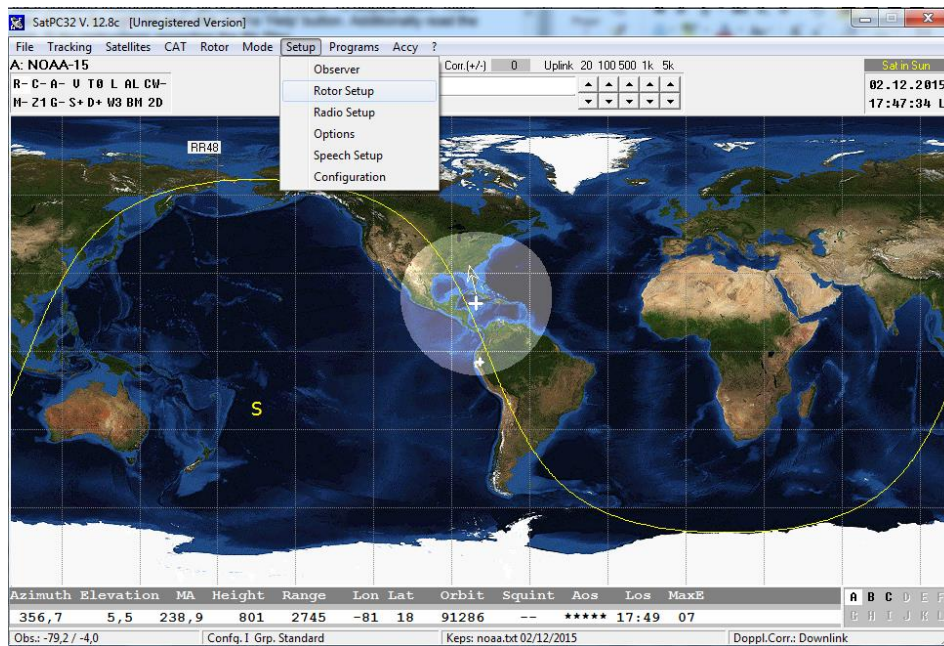


Figura E.1.- Menú Setup para configuración de rotor  
Fuente: Imagen propia de los autores.

Primeramente, como se observa en la figura E.2 se selecciona la interfaz de controlador que se va a utilizar, en este caso la Yaesu\_GS-232, luego haga clic en el botón superior ‘*Store*’.

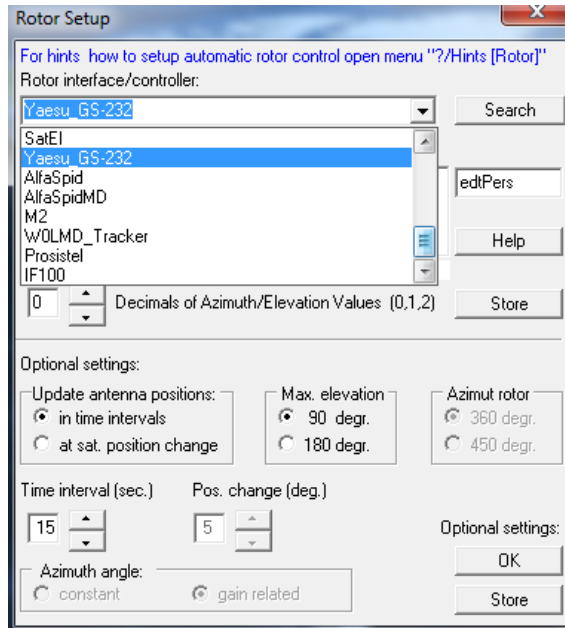


Figura E.2.- Selección de la interfaz del rotor/controlador.

Fuente: Imagen propia de los autores.

Se puede elegir también el tipo de seguimiento que se le desea hacer al satélite (figura E.3), es decir, decidir si el seguimiento debe hacerse con ciertos intervalos de tiempo o quiere hacerse con respecto sobre los cambios de posición por satélite (cambio angular). Para los satélites de órbita baja se recomienda el uso de intervalos de 10 segundos y a 5 grados de ángulo.

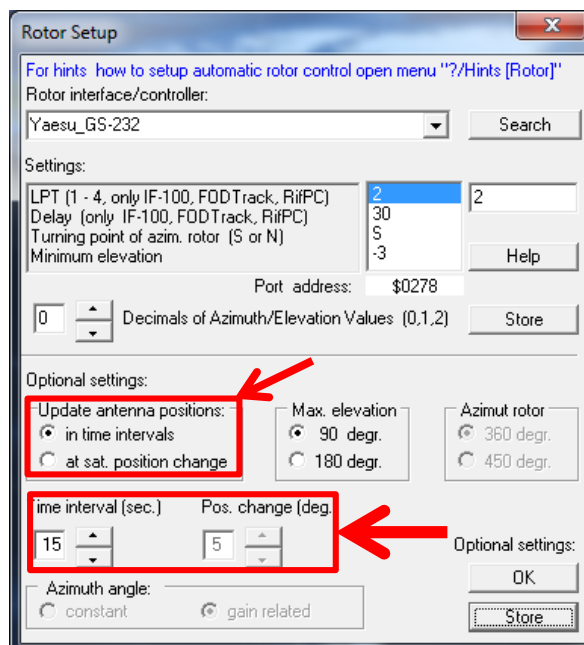


Figura E.3.- Configuración del rotor.

Fuente: Imagen propia de los autores.

Una vez hechos todos los cambios se debe presionar el segundo botón “Store” para guardar los cambios y para que todos los cambios hagan efecto se debe reiniciar SatPC32.

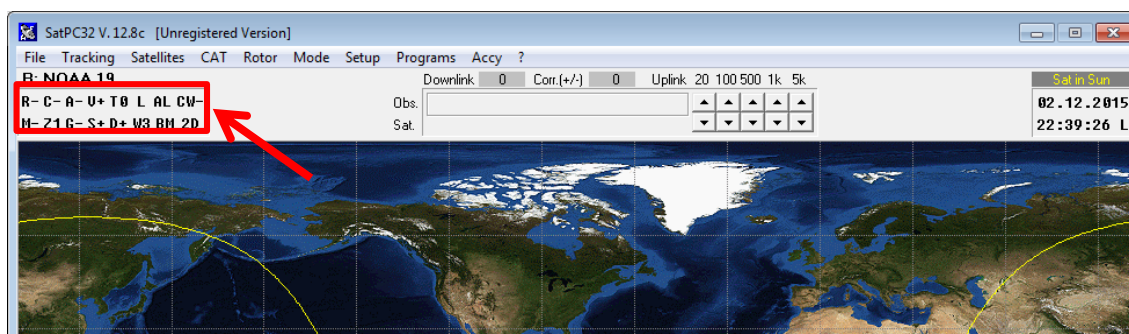


Figura E.4.- Funciones de SatPC32.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

En la parte inferior izquierda de la barra de menú de SatPC32, tal como se ve en la figura e.4 existen 16 íconos de control, de los cuales los más utilizados se detallan a continuación:

- **R:** Control del rotor; permite activar o desactivar el control externo automático.
- **A:** Permite una conmutación automática hacia un nuevo satélite que tenga cobertura sobre la estación terrena.
- **U (o L):** Cambia la visualización del tiempo entre la hora UTC y la hora local.
- **M:** Activa la visualización de múltiples satélites.
- **Z1:** Zoom para visualización del mapa.
- **D:** Activas las flechas de dirección que indican el movimiento de las huellas de satélite.
- **W1 (o 2 o 3):** Permite cambiar el tamaño de la ventana.

Para seleccionar la lista de los satélites que se desean ver se tiene que ingresar en el menú “Satellites” (figura e.5)

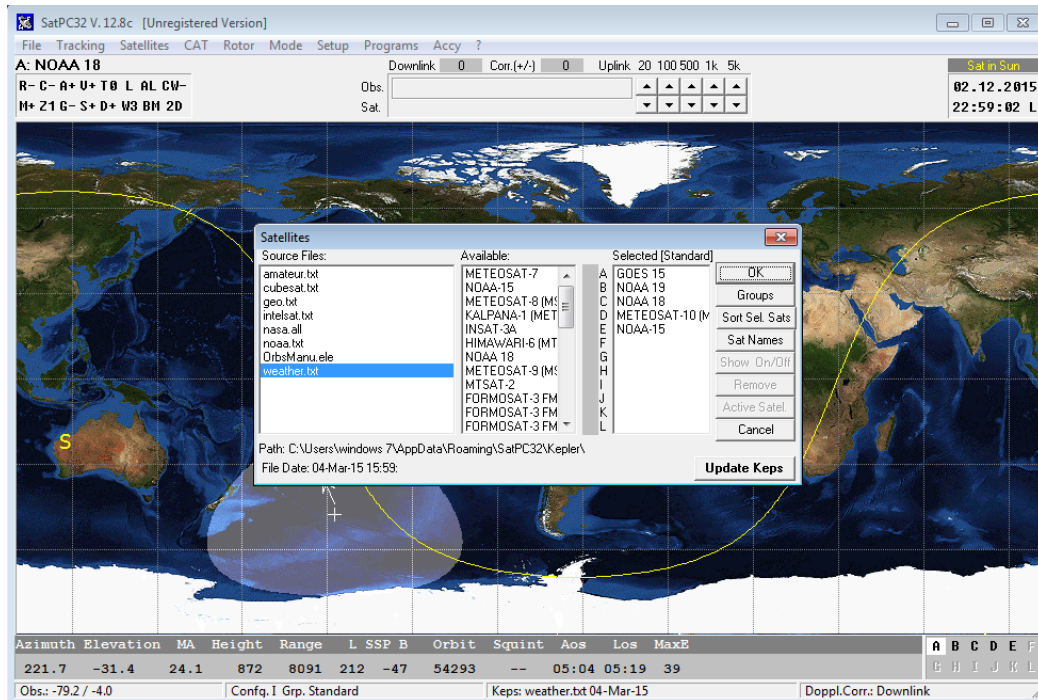


Figura E.5.- Selección de los satélites.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

En la parte izquierda se puede ver los tipos de satélites, ya sea, por su función o por la empresa o institución que los administra; en la parte central se puede ver los nombres de los diferentes satélites de esa categoría, si se desea agregar alguno de esos se debe hacer doble clic sobre él, en la parte derecha se puede observar los satélites seleccionados.

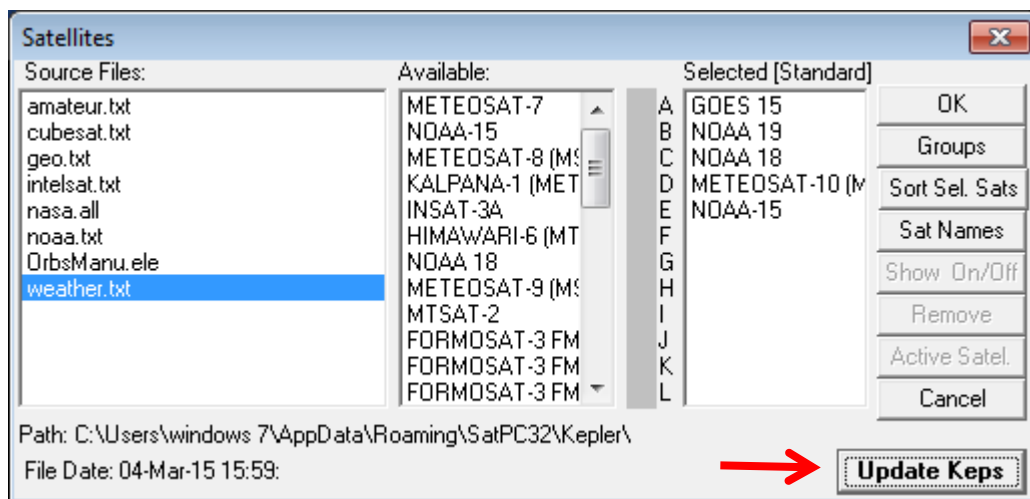


Figura E.6.- Actualización de los Keplers.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

Antes de seleccionar la lista de los satelites se debe hacer una actualizacion de los datos keplerianos de los satelites para garantizar que las coordenadas de cada satélite sean las correctas con respecto a la estación terrena (figura e.6 y E.7).

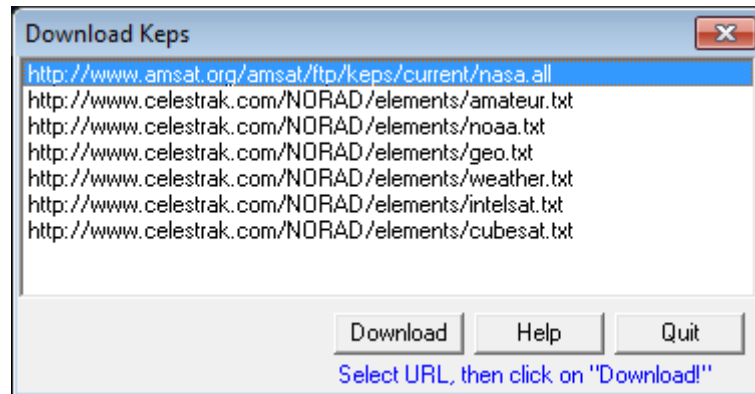


Figura E.7.- Descarga de Keplers.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

Se selecciona cada tipo de satellite y se da click en “Download” para realizar la actualizacion de los keplers, una vez hecho esto aparecerá un mensaje de “Download Sucessfull”.

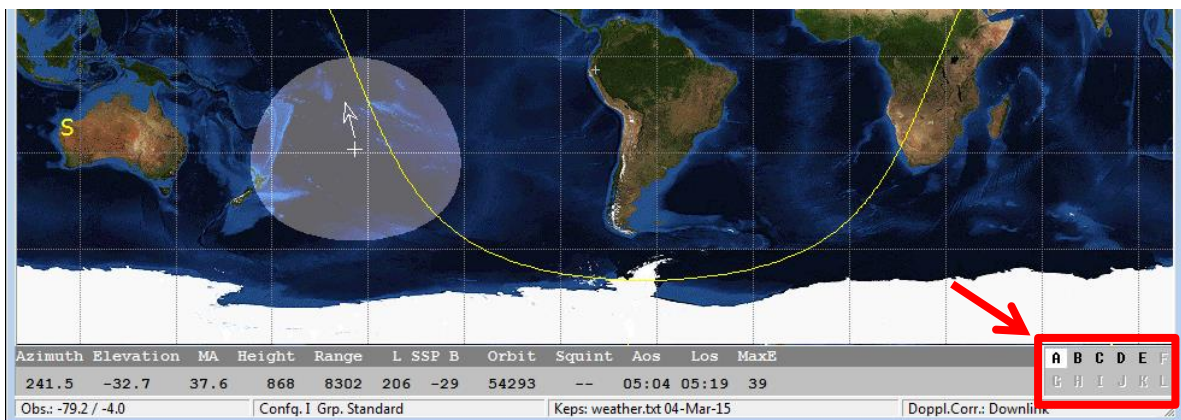


Figura E.8.- Listado de los satélites seleccionados  
Fuente: Imagen propia de los autores.

Como lo muestra la figura e.8 en la parte inferior derecha se pueden ver la lista de satélites seleccionado designados por una letra, dependiendo de la letra que se seleccione se podrá ver el satélite, sus huellas en el mapa mundial, y el área de cobertura del mismo. Cuando una letra de estas se visualiza resaltada con fondo blanco significa que el satélite tiene cobertura sobre la estación terrena.



## E.2. Server SDX.

Para que SatPC32 se pueda comunicar mediante comunicación serial con el Arduino nano es necesario activar el Server SDX ( figura e.9), que viene integrado en el *software* de SatPC32, Server SDX es un programa servidor DDE<sup>14</sup> requerido por el *software* de SatPC32 y necesario para que el controlador se pueda comunicar con una tarjeta o circuito de control externo esta comunicación se lleva a cabo a través del puerto COM.

Por medio del servidor DDE, el Server SDX lee la orientación actual de la antena montada en el rotor y también lee las coordenadas calculadas por el programa principal de SatPC32, esta transferencia de datos se da por el COM, en el cual está conectado el Arduino Nano, donde se realiza la programación para poder reposicionar el rotor en base a las coordenadas indicadas por SatPC32.

Cada vez que se ejecute el programa de SatPC32 el ServerSDX se cargará y cerrará de forma automática. También se puede utilizar en el modo '*stand alone*', por ejemplo, para entrar en posiciones de la antena manualmente.

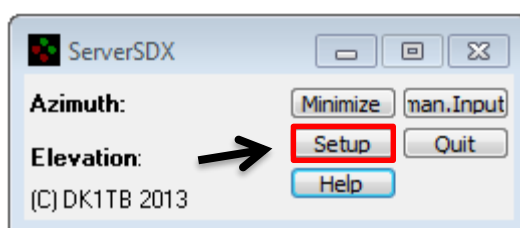


Figura E.9.- Interfaz gráfica de ServerSDX.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

Para la configuración del puerto COM a utilizar se hace clic en el botón "*Setup*" como se puede observar en la figura e.9, a continuación, una ventana se abrirá (figura e.10), y en esta se debe seleccionar el puerto COM al que está conectada la interfaz.

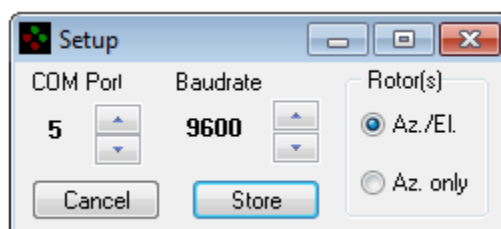


Figura E.10.- Configuración del puerto COM de ServerSDX  
Fuente: Imagen propia de los autores.

---

<sup>14</sup> Dynamic Data Exchange

Antes de seleccionar un puerto COM se debe asegurar de que el puerto se encuentra disponible y no está siendo usado por el programa principal SatPC32 para dirección CAT o por cualquier otro programa, si es así, el ServerSDX mostrará un mensaje de error. En caso de que se produzca este error, se debe abrir la ventana de "Setup" del ServerSDX y seleccionar el puerto COM correcto, cabe recordar que debemos seleccionar el mismo COM en el que se ha conectado el Arduino Nano. Una vez elegidos los valores del puerto COM, del baudrate y del movimiento del rotor (tanto en Azimut y Elevación o solo en Azimut) se guarda lo hecho en el botón "Store".

**ANEXO F**  
**CONFIGURACIÓN DE HRPT Reader**

## F.1. Configuración de HRPT Reader.

En la parte superior en el menú “Options” se selecciona la pestaña “Overlay options...” como se ve en la figura F.1.

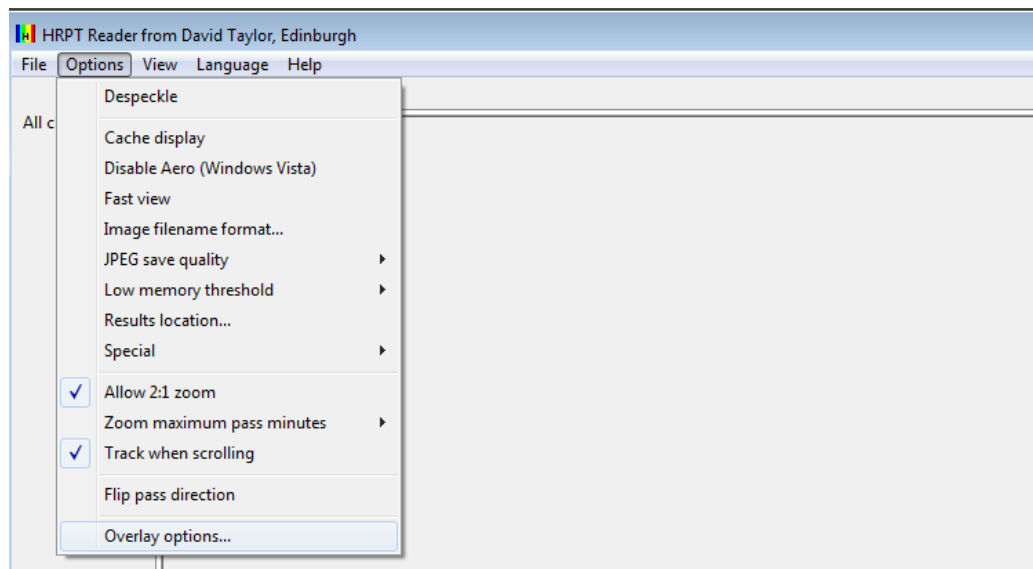


Figura F.1.- Menú opciones para configuración.  
Fuente: Imagen propia de los autores.

En “Overlay options...” se debe configurar la ubicación de la estación terrena tanto en latitud como en longitud. Las coordenadas de la UTPL son Latitud: -3,9867189 y Longitud: -79,1969962 (figura F.2).

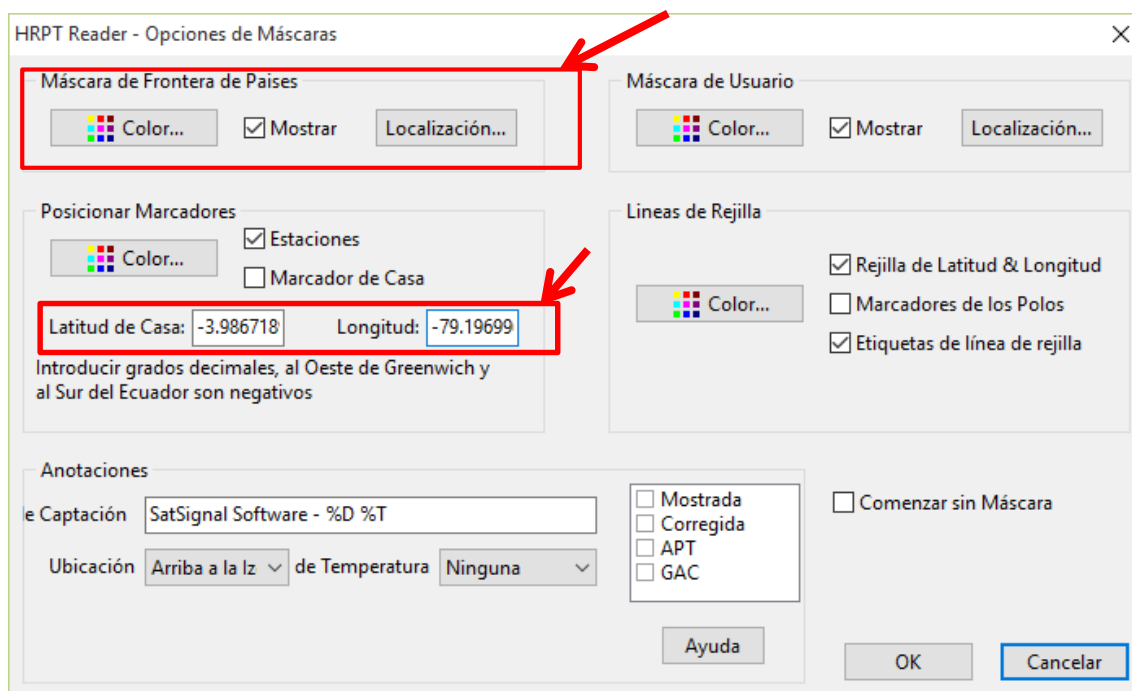


Figura F.2.- Configuración HRPT Reader  
Fuente: Imagen propia de los autores.

También se puede cargar un archivo .dat que permita visualizar los límites de los países (figura F.3).

En la figura F.4 se puede ver un archivo de un ejemplo de una imagen cargada, en el que se puede ver las limitaciones de los países, en donde se puede apreciar los límites de Ecuador en la parte superior derecha de la imagen.

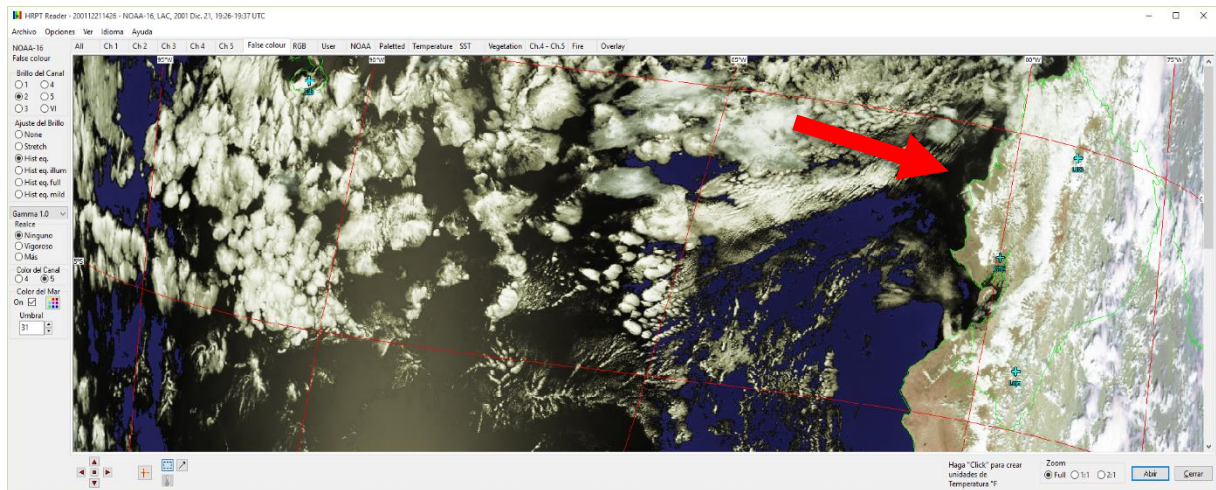


Figura F.4.- Interfaz *HRPT Reader* configurado.

Fuente: Imagen propia de los autores.

**ANEXO G**  
**PRUEBAS DE PRECISIÓN DEL SEGUIMIENTO AUTOMÁTICO**

El día sábado 19 de marzo del 2016 se realizaron dos pruebas adicionales del sistema de seguimiento automático para verificar la precisión del mismo. Los resultados son los siguientes:

✓ **Prueba N° 1.- Pase del satélite NOAA 19.**

Figura G.1 Datos y diagramas del pase satelital.

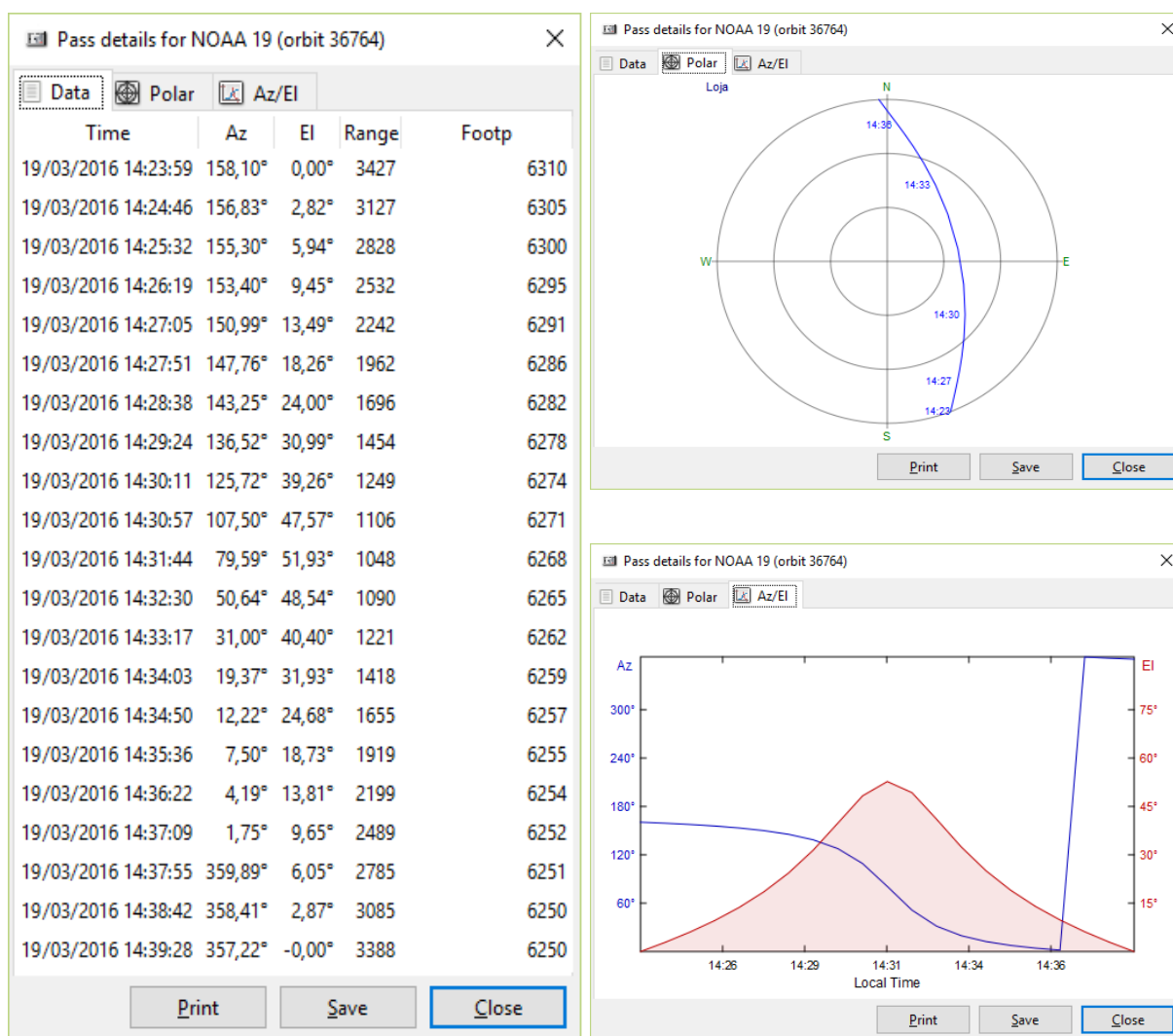


Tabla G.1. Comparativas para determinar los grados de error en azimuth (2,9°) y elevación (1,9°):

Fecha	DATOS GPREDICT		SEGUIMIENTO AUTOMÁTICO		ERROR EN AZIMUTH	ERROR EN ELEVACIÓN
	Hora	Azimuth Satélite	Elevación Satélite	Azimuth Rotor		
19/03/2016	14:23:59	158,10	0,00	161,3	3,2	1,2
19/03/2016	14:24:46	156,83	2,82	158,9	2,07	0,28
19/03/2016	14:25:32	155,30	5,94	157,7	2,4	2,76
19/03/2016	14:26:19	153,40	9,45	155,5	2,1	1,75
19/03/2016	14:27:05	150,99	13,49	152,1	1,11	2,01
19/03/2016	14:27:51	147,76	18,26	149,4	1,64	2,84
19/03/2016	14:28:38	143,25	24,00	146,7	3,45	3,4
19/03/2016	14:29:24	136,52	30,99	139,1	2,58	1,31
19/03/2016	14:30:11	125,72	39,26	129,4	3,68	3,14
19/03/2016	14:30:57	107,50	47,57	111,2	3,7	3,53
19/03/2016	14:31:44	79,59	51,93	82,1	2,51	0,57
19/03/2016	14:32:30	50,64	48,54	59,3	3,86	1,36
19/03/2016	14:33:17	31,00	40,40	54,5	2,6	1,7
19/03/2016	14:34:03	19,37	31,93	33,6	2,73	1,27
19/03/2016	14:34:50	12,22	24,68	22,1	1,08	1,92
19/03/2016	14:35:36	7,50	18,73	13,3	2,2	1,57
19/03/2016	14:36:22	4,19	13,81	9,7	2,11	1,69
19/03/2016	14:37:09	1,75	9,65	6,3	0,45	2,55
19/03/2016	14:37:55	359,89	6,05	349,5	10,39	2,75
19/03/2016	14:38:42	358,41	2,87	352,6	5,81	0,67
19/03/2016	14:39:28	357,22	0,00	355,4	1,82	0,7
					<b>2,9</b>	<b>1,9</b>

Figura G.2. Datos obtenidos:

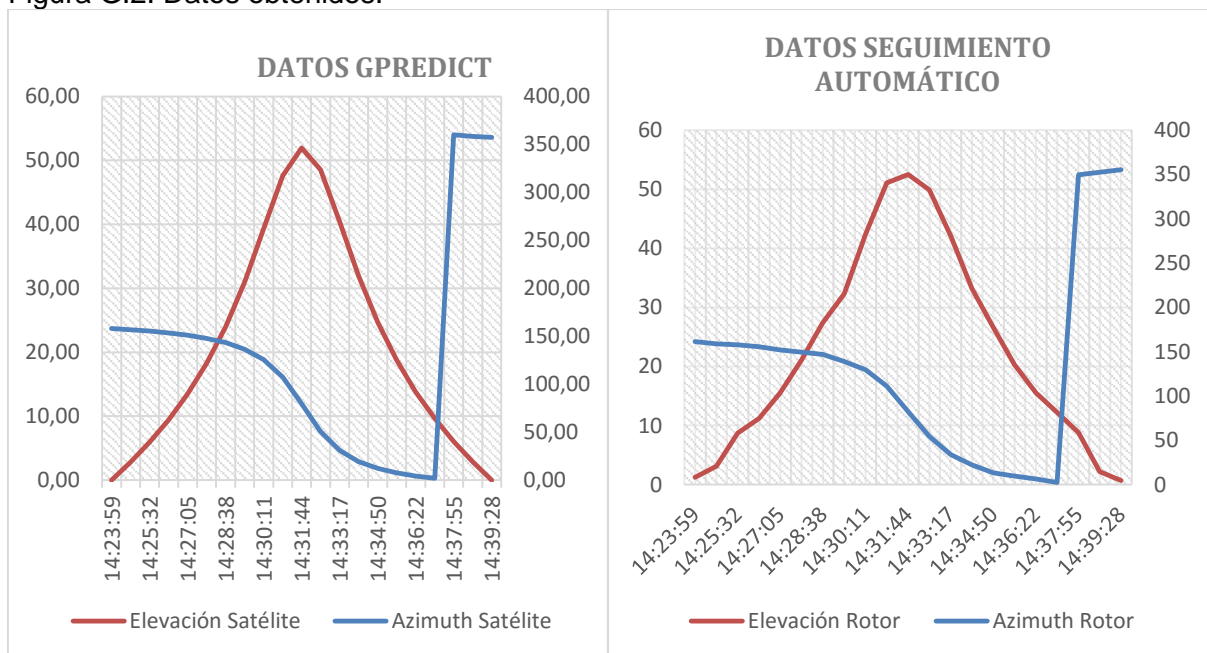




Figura G.3. Error en la precisión del seguimiento:

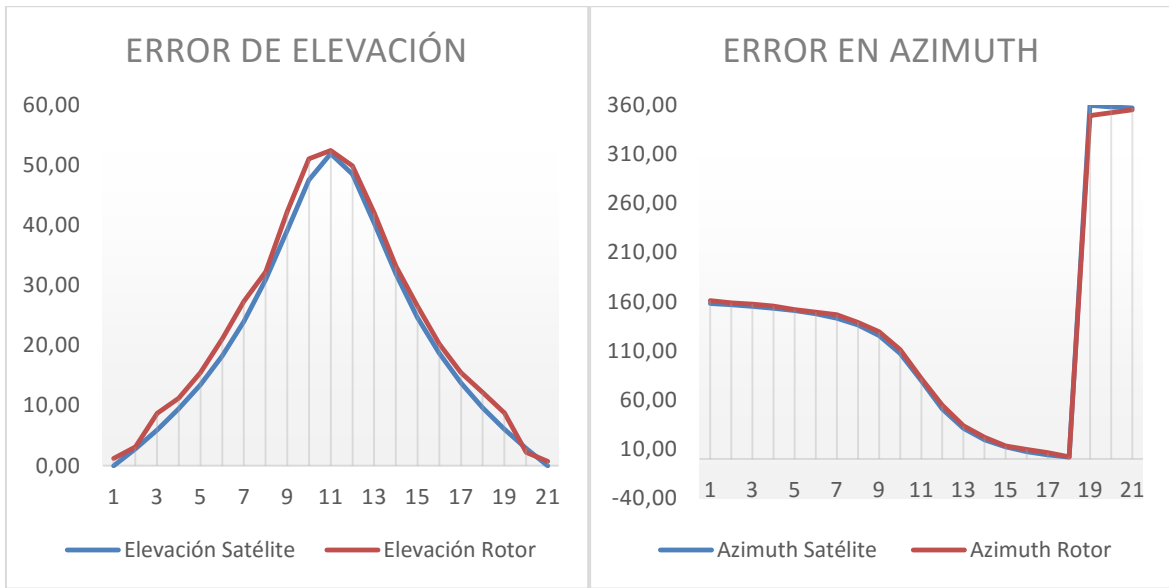
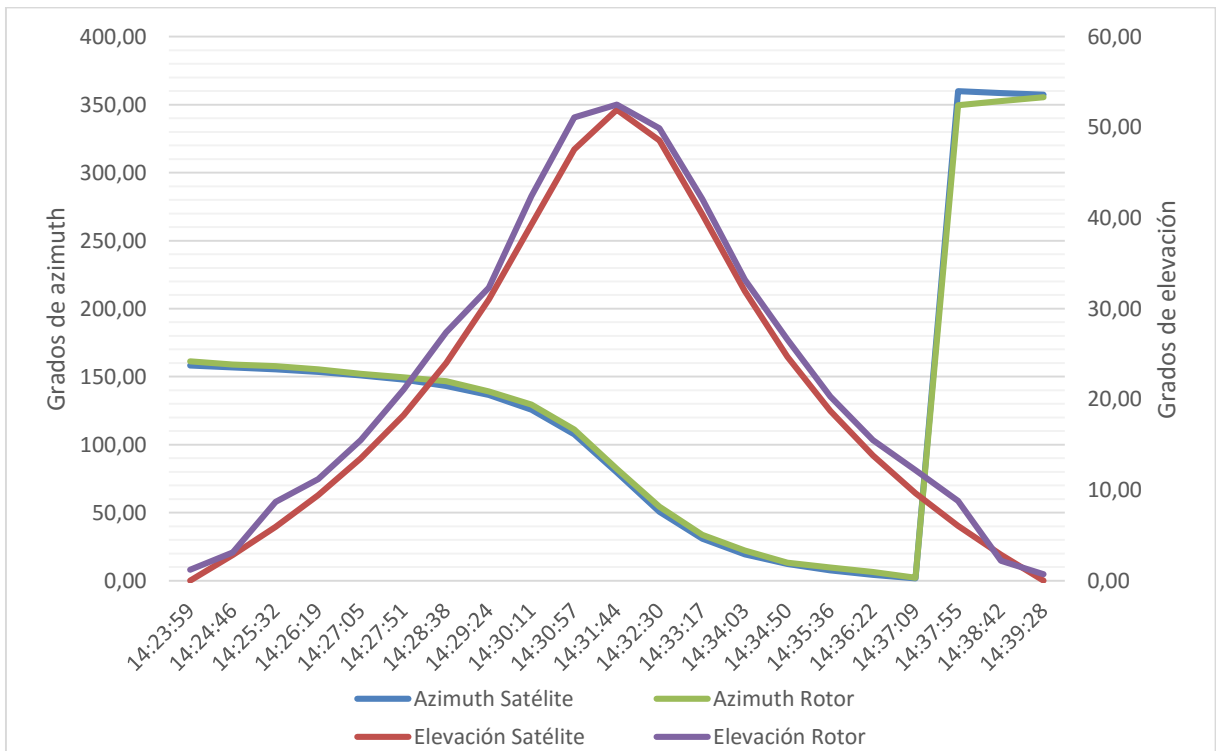


Figura G.4. Comparativa final.



✓ Prueba N° 2.- Pase del satélite NOAA 18.

Figura G.5. Datos y diagramas del pase satelital.

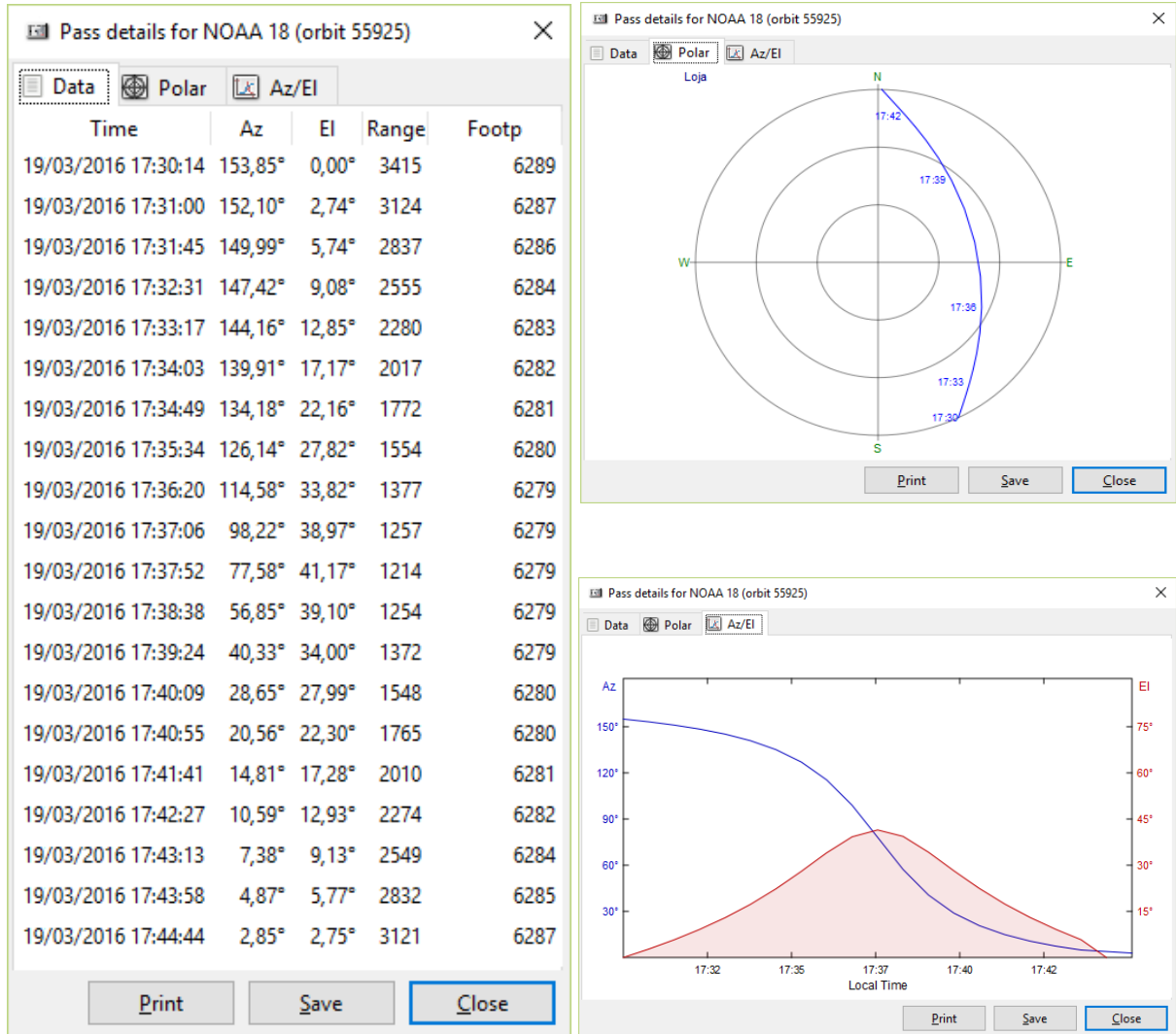


Tabla G.2. Comparativas para determinar los grados de error en azimuth (1,7°) y elevación (1,4°):

Fecha	DATOS GPREDICT		SEGUIMIENTO AUTOMÁTICO		ERROR EN AZIMUTH	ERROR EN ELEVACIÓN
	Hora	Azimuth Satélite	Elevación Satélite	Azimuth Rotor		
19/03/2016	17:30:14	153,85	0,00	154,7	0,85	1,1
19/03/2016	17:31:00	152,1	2,74	153,2	1,1	0,24
19/03/2016	17:31:45	149,99	5,74	151,7	1,71	1,86
19/03/2016	17:32:31	147,42	9,08	148,8	1,38	2,12
19/03/2016	17:33:17	144,16	12,85	146,2	2,04	1,45
19/03/2016	17:34:03	139,91	17,17	140,7	0,79	2,93
19/03/2016	17:34:49	134,18	22,16	137,1	2,92	2,14
19/03/2016	17:35:34	126,14	27,82	129,2	3,06	2,18
19/03/2016	17:36:20	114,58	33,82	116,9	2,32	1,88
19/03/2016	17:37:06	98,22	38,97	101,1	2,88	2,23
19/03/2016	17:37:52	77,58	41,17	80,2	2,62	1,53
19/03/2016	17:38:38	56,85	39,10	59,3	2,45	0,3
19/03/2016	17:39:24	40,33	34,00	41,1	0,77	1,6
19/03/2016	17:40:09	28,65	27,99	29,6	0,95	2,31
19/03/2016	17:40:55	20,56	22,30	21,9	1,34	1,8
19/03/2016	17:41:41	14,81	17,28	16,6	1,79	1,52
19/03/2016	17:42:27	10,59	12,93	12,2	1,61	0,27
19/03/2016	17:43:13	7,38	9,13	10,3	2,92	1,47
19/03/2016	17:43:58	4,87	5,77	6	1,13	0,43
19/03/2016	17:44:44	2,85	2,75	3,3	0,45	0,55
19/03/2016	18:45:27	1,98	0,03	1,3	0,68	0,47
					<b>1,7</b>	<b>1,4</b>

Gráfica G.6. Datos obtenidos del satélite.

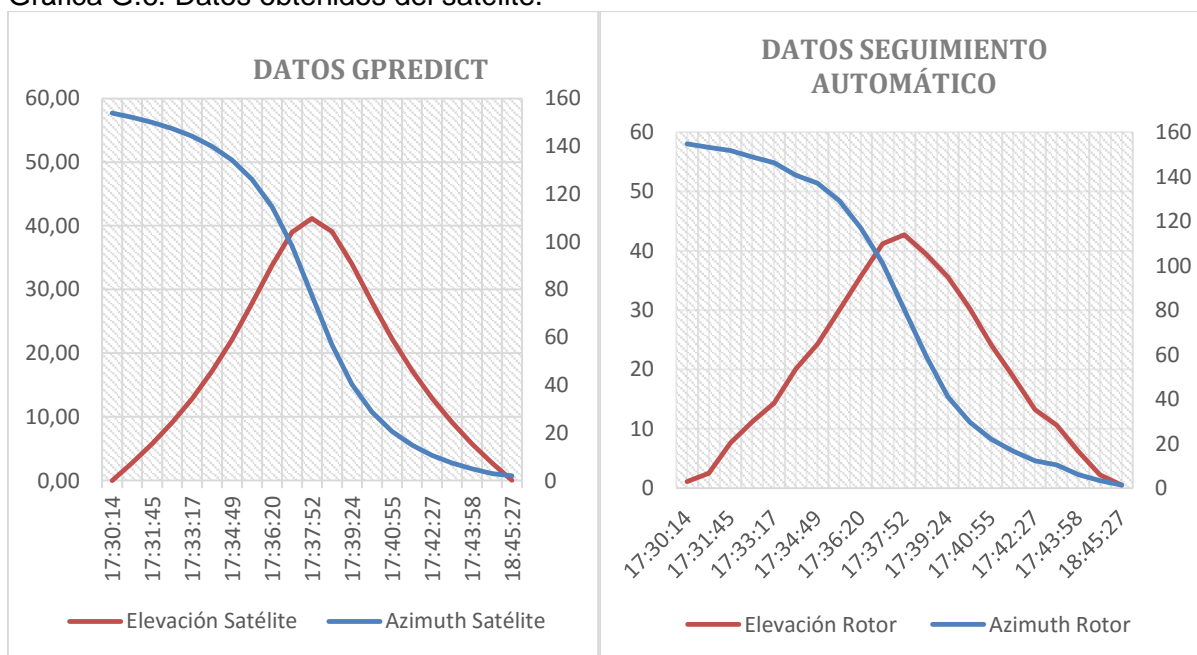


Figura G.7. Error en la precisión del seguimiento.

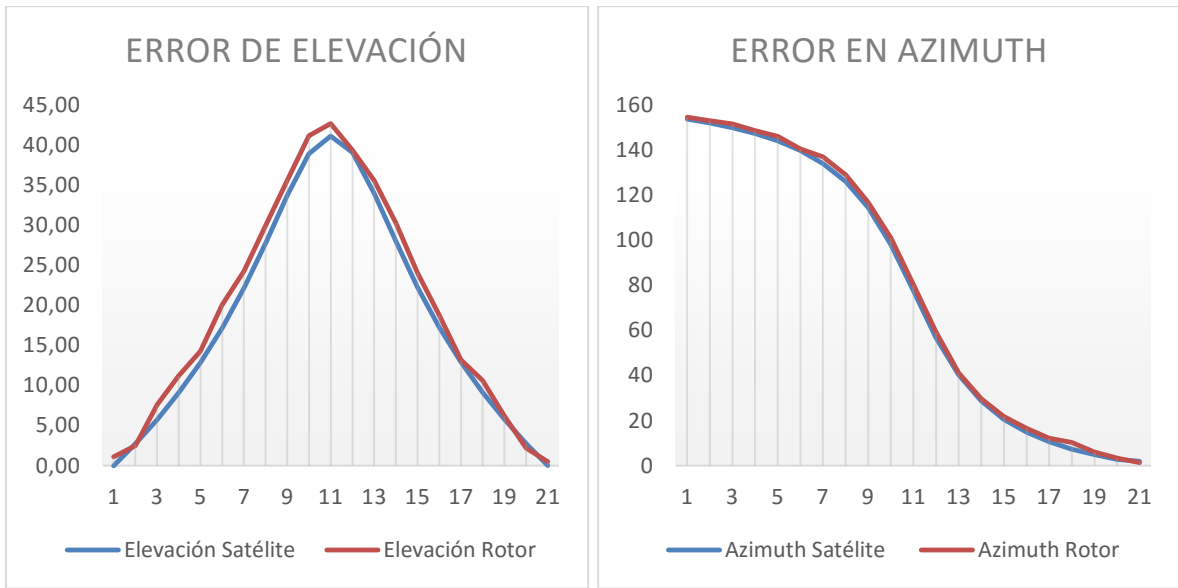
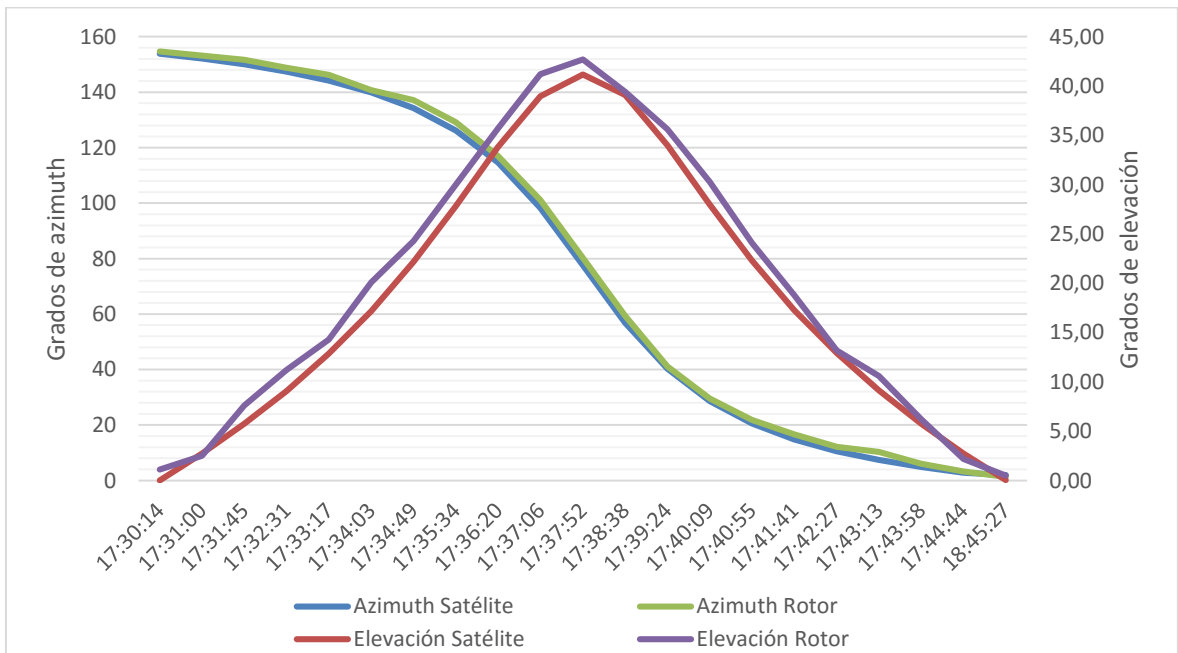


Figura G.8. Comparativa final.



**ANEXO H**  
**GLOSARIO DE TÉRMINOS**

<b>AHRPT</b>	<i>Advanced High Resolution Picture Transmission</i>
<b>AOS</b>	<i>Acquisition of Signal, when a pass starts.</i>
<b>APT</b>	<i>Automatic Picture Transmission</i>
<b>AVHRR</b>	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
<b>BPSK</b>	<i>Binary Phase Shift keying</i>
<b>CHRPT</b>	<i>Color High Resolution Picture Transmission</i>
<b>FRAC</b>	<i>Full Resolution Area Coverage</i>
<b>GAC</b>	<i>Global Area Coberage</i>
<b>GARP</b>	<i>Global Atmospheric Research Program).</i>
<b>GEO</b>	<i>Geostationary Earth Orbit</i>
<b>GOES</b>	<i>Global Operational Environmental Satellite</i>
<b>GOMS</b>	<i>Geostationary Operational Meteorological Satellite</i>
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>
<b>HRIT</b>	<i>High Rate Information Transmission</i>
<b>HRPT</b>	<i>High Resolution Picture Transmission</i>
<b>ITU</b>	<i>International Telecommunication Union</i>
<b>LAC</b>	<i>Local Area Coverage</i>
<b>LEO</b>	<i>Low Earth Orbit</i>
<b>LHCP</b>	<i>Left Hand Circular Polarised</i>
<b>LOS</b>	<i>Loss of Signal, when a pass ends.</i>
<b>LRIT</b>	<i>Low Rate Information Transmission</i>
<b>MEO</b>	<i>Medium Earth Orbit</i>
<b>MVISR</b>	<i>Multichannel Visible and IR Scan Radiometer</i>
<b>NASA</b>	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<b>NESDIS</b>	<i>National Environmental Satellite and Information Service</i>
<b>NOAA</b>	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
<b>POES</b>	<i>Polar Operational Environmental Satellite</i>
<b>RHCP</b>	<i>Right Hand Circular Polarised</i>
<b>ROE</b>	<i>Relacion de Ondas Estacionarias</i>
<b>SDR</b>	<i>Software Defined Radio</i>
<b>TIROS</b>	<i>Television Infra Red Observation Satellite</i>
<b>UHD</b>	<i>USRP Hardware Driver</i>
<b>USRP</b>	<i>Universal Software Radio Peripheral</i>