

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO DE UNA ESTACIÓN TERRENA CON ESTRUCTURA  
MODULAR PARA EL MONITOREO Y CONTROL DE MISIONES  
SATELITALES UNIVERSITARIAS**

**Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico**

**AUTOR:**

Diego Leonardo Antonio Vilca Palma

**ASESOR:**

Juan Antonio Jave Sagastegui

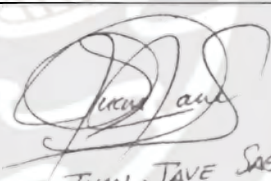
Lima, julio, 2024

### Informe de Similitud

Yo, ...JUAN ANTONIO JAVE SAGASTEGUI....., docente de la Facultad de .....CIENCIAS E INGENIERIA..... de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado .....DISEÑO DE UNA ESTACIÓN TERRENA CON ESTRUCTURA MODULAR PARA EL MONITOREO Y CONTROL DE MISIONES SATELITAES UNIVERSITARIAS....., del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as) .....DIEGO LEONARDO ANTONIO VILCA PALMA....., dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 12%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 08/07/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: ...LIMA 08 DE JULIO DEL 2024.....

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Jave Sagastegui, Juan Antonio	
DNI: 43030305	Firma  JUAN JAVE SAGASTEGUI
ORCID: 0000-0001-6928-568X	

# Resumen

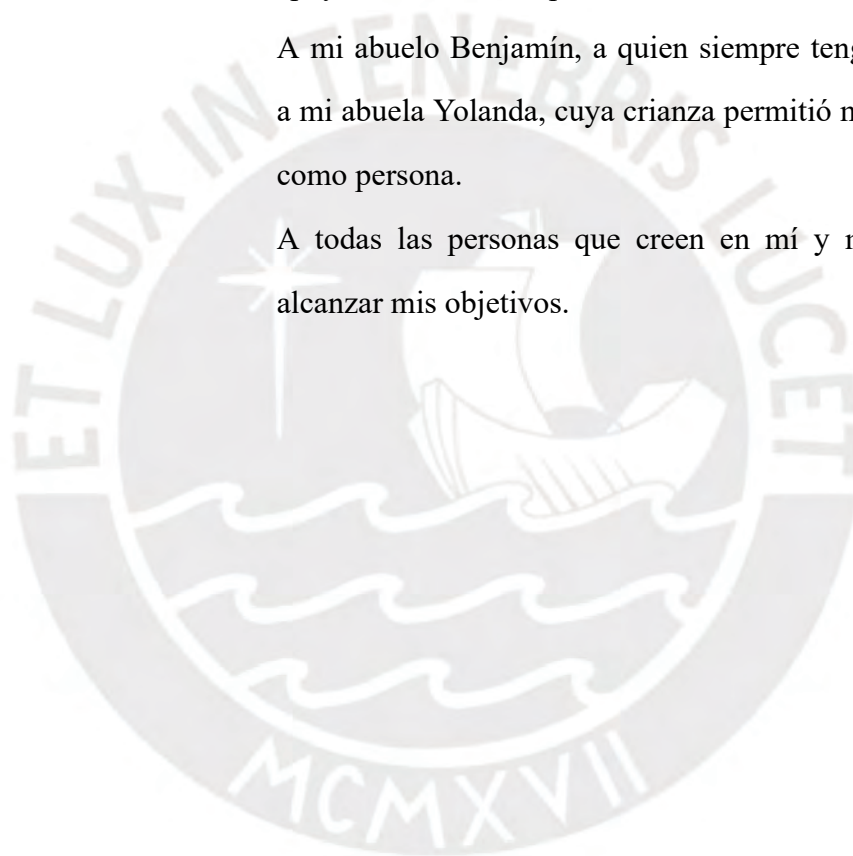
En un proyecto satelital, el desarrollo de una estación terrena es tan esencial como el desarrollo del satélite mismo. Debido a ello, para el proyecto PUCP-SAT1, desarrollado en el Instituto de Radioastronomía (INRAS) de la Pontificia Universidad Católica del Perú, se implementó una estación terrena que viene operando desde el 2013, cuando fueron lanzados el PUCP-SAT1 y el Pocket-PUCP. En aras del desarrollo de un nuevo proyecto satelital, se busca que la estación sea adaptable no solo a las especificaciones del nuevo satélite, sino que permita el monitoreo de otras misiones con especificaciones técnicas diferentes a los originales.

Este trabajo presenta el diseño de una estación terrena modular, el cual, al igual que la estación terrena del INRAS y gran parte de las estaciones terrenas de instituciones educativas en el mundo, contempla una comunicación con satélites en bandas de frecuencias utilizadas por radioaficionados, además de comunicarse por medio de protocolos empleados por estos. Además, se opta por un enfoque modular de diseño, lo cual le confiere a la estación propiedades como flexibilidad y capacidad de mejora. Este enfoque además permite que el diseño propuesto pueda utilizarse como base para la formación de redes de estaciones terrenas que permitan el monitoreo de más de un satélite por una mayor cantidad de tiempo.

A mis padres Lourdes y Antonio, de quienes siempre recibí apoyo en todos los aspectos.

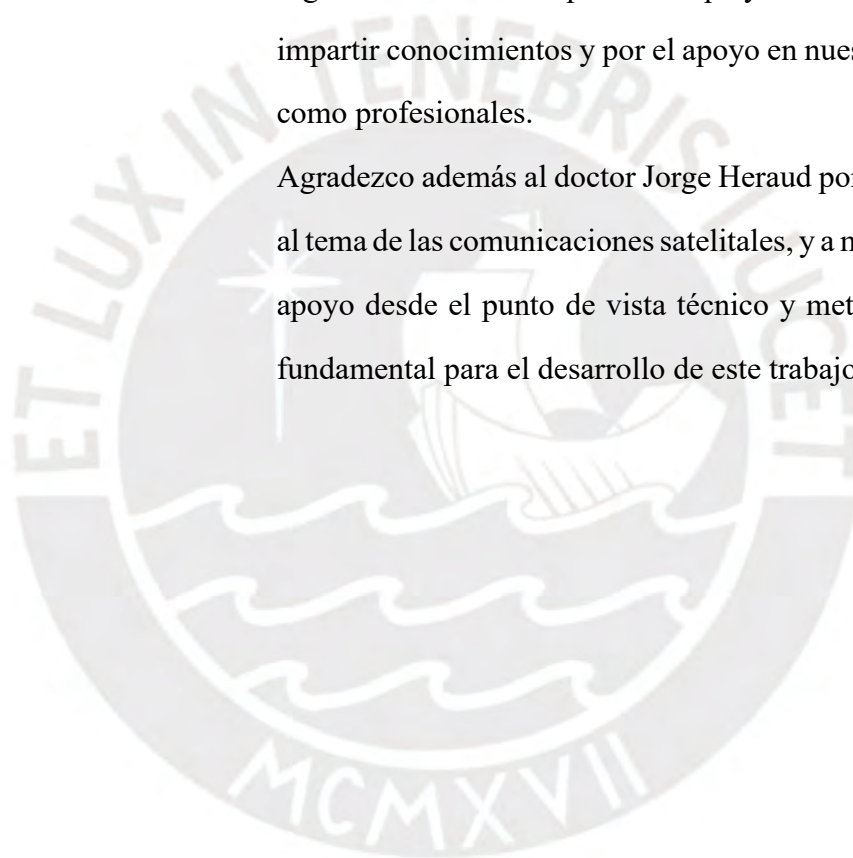
A mi abuelo Benjamín, a quien siempre tengo presente, y a mi abuela Yolanda, cuya crianza permitió mi crecimiento como persona.

A todas las personas que creen en mí y me motivan a alcanzar mis objetivos.



Agradezco a todos los profesores de la Especialidad de Ingeniería Electrónica por el tiempo y esfuerzo dedicados a impartir conocimientos y por el apoyo en nuestro desarrollo como profesionales.

Agradezco además al doctor Jorge Heraud por introducirme al tema de las comunicaciones satelitales, y a mi asesor, cuyo apoyo desde el punto de vista técnico y metodológico fue fundamental para el desarrollo de este trabajo.



# Índice general

IV

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Índice general</b>	<b>IV</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>VII</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>X</b>
<b>Introducción</b>	<b>XI</b>
<b>1. MARCO PROBLEMÁTICO</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción a la Estación Terrena Universitaria . . . . .	1
1.2. El proyecto PUCP-SAT1 . . . . .	2
1.3. Estado del arte de estaciones terrenas . . . . .	3
1.3.1. Bandas de Frecuencia . . . . .	3
1.3.2. Dispositivos de comunicación . . . . .	3
1.3.3. Estaciones terrenas en la última década . . . . .	4
1.4. Justificación . . . . .	6
1.5. Objetivos . . . . .	7
1.5.1. Objetivo principal . . . . .	7
1.5.2. Objetivos específicos . . . . .	8
<b>2. CONCEPTOS DE DISEÑO</b>	<b>9</b>
2.1. Procesos realizados en una Estación Terrena . . . . .	9
2.1.1. Procesos de Monitoreo y Control del Satélite . . . . .	9
2.1.2. Procesos de Manejo de Carga Útil . . . . .	11

2.2. Servicio Satelital de Radioaficionados . . . . .	12
2.2.1. Frecuencias Atribuidas al Servicio . . . . .	12
2.2.2. Protocolo AX.25 . . . . .	13
2.3. Diseño modular . . . . .	15
<b>3. DISEÑO DE LA ESTACIÓN TERRENA MODULAR</b>	<b>17</b>
3.1. Requerimientos y consideraciones . . . . .	17
3.1.1. Enlace de Comunicaciones . . . . .	17
3.1.2. Procesos dentro de la estación . . . . .	18
3.2. Diseño de la estación . . . . .	19
3.2.1. Sección de Radiofrecuencia . . . . .	21
3.2.2. Sección de Procesamiento de Señales . . . . .	25
3.2.3. Sección de Datos y Control . . . . .	30
<b>4. SIMULACIÓN REPRESENTATIVA Y RESULTADOS</b>	<b>34</b>
4.1. Funcionamiento general de la estación terrena . . . . .	34
4.1.1. Procesos de la estación . . . . .	34
4.1.2. Características propias de la estación . . . . .	36
4.2. Comparación con estación terrena INRAS . . . . .	41
<b>Observaciones</b>	<b>44</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>45</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>47</b>
<b>A. Códigos para simulación</b>	<b>50</b>

A.1. Programa del Arduino Nano SELECTOR para simulación . . . . . 50

A.2. Programa del Arduino Nano SECUENCIADOR para simulación . . . . . 51



# Índice de figuras

2.1.	Trama de un radio-paquete AX.25. . . . .	14
3.1.	Esquema completo del diseño propuesto para la estación terrena. . . . .	20
3.2.	Distribución de componentes de la Sección de Radiofrecuencia. . . . .	21
3.3.	Arreglos de antenas Yagi para comunicaciones en VHF (izquierda) y UHF (derecha) . . . . .	22
3.4.	Par de rotores azimut-elevación <i>Yaesu</i> G5500 del arreglo de antenas Yagi para banda UHF. . . . .	22
3.5.	LNA para banda UHF de $Ar^2$ (P432VDG). . . . .	23
3.6.	Diagrama de bloques (arriba) y diagrama esquemático (abajo) del interruptor RF. . . . .	24
3.7.	Par de módulos Secuenciadores ubicados en la Sección de Radiofrecuencia (arriba izquierda), diagrama de bloques (arriba derecha) y diagrama esquemático (abajo) del módulo. . . . .	25
3.8.	Distribución de componentes de la Sección de Procesamiento de Señales. . . . .	26
3.9.	Tranceptores comerciales <i>Yaesu</i> modelos FT-847 (arriba) y FT-726R (abajo). . . . .	27
3.10.	Arriba, receptor software de la marca <i>RF Space</i> , modelo SDR-14 usado en conjunto con el transceptor FT-726R para recepción. Abajo, ejemplo del funcionamiento del mencionado par transceptor - receptor software. . . . .	28
3.11.	Controlador de nodo terminal (TNC) PK-232 PSK de la marca <i>Timewave</i> . . . . .	28

3.12. Módulo ‘Selector y Control PTT’ ubicado en la Sección de Procesamiento de Señales (izquierda) diagrama de bloques (derecha) y diagrama esquemático del módulo (abajo). . . . .	29
3.13. SDR de <i>Ettus Research</i> modelo USRP X310. Los conectores RF se encuentran del lado opuesto. . . . .	30
3.14. Distribución de componentes de la Sección de Datos y Control. . . . .	31
3.15. Parte frontal (izquierda) y parte posterior (derecha) de la unidad de control de rotores <i>Yaesu G-5500</i> . . . . .	31
3.16. Interfaz de control por computadora desarrollada en el INRAS-PUCP. . . . .	32
3.17. Software controlador desarrollado en INRAS-PUCP. También se puede observar al programa <i>Orbitron</i> minimizado. . . . .	33
4.1. Programa <i>Orbitron</i> en ejecución. En este ejemplo, el programa realiza el rastreo de la Estación Espacial Internacional (ISS) y calcula la frecuencia de transmisión y recepción del transceptor que contrarresta el efecto Doppler producido por el movimiento del objeto rastreado. . . . .	35
4.2. Diagrama de tiempos que describe el comportamiento de los interruptores RF y el transceptor de una línea de comunicación. Los periodos $t_1$ , $t_2$ , $t_3$ y $t_4$ deben definirse según los parámetros técnicos de los equipos. . . . .	37
4.3. Esquema de simulación de cambio entre modo transmisión y recepción de una línea de comunicación. . . . .	38
4.4. Simulación del circuito mostrado. Izquierda: Recepción. Derecha: Transmisión. . . . .	39

- 4.5. Diagrama de tiempos de la simulación realizada, con un retardo programado de 1 ms. La línea roja representa el modo de comunicación del transceptor (alto: transmisión, bajo, recepción). Las líneas amarilla y azul representan, respectivamente, a los interruptores RF conectados a la entrada y a la salida del LNA de la línea de comunicación. . . . . 40
- 4.6. Características de la estación terrena del INRAS. Extraído de [2] . . . . . 41
- 4.7. Especificaciones de frecuencias utilizadas en la estación terrena del INRAS. Extraído de [22] . . . . . 41



# Índice de Tablas

- 2.1. Frecuencias habilitadas para el servicio de aficionados por satélite. Se ha omitido las bandas de frecuencia menos utilizadas. Adaptada de [4]. . . . . 13
- 4.1. Comparación entre estación terrena INRAS y la estación diseñada . . . . . 42



# Introducción

En 1970, la Universidad de Melbourne, en Australia, se convirtió en la primera universidad en lanzar un satélite al espacio hecho íntegramente por estudiantes: el microsatélite Australis - OSCAR5. Diez años después, otro evento similar ocurrió, esta vez con la Universidad de Surrey y el satélite UoSAT-1 como protagonistas. Con estos dos lanzamientos se daba comienzo a una lista de proyectos satelitales impulsados por instituciones educativas superiores, lista que aumentaba lentamente por tratarse de proyectos muy ambiciosos para la época debido a los costos y tiempos [1].

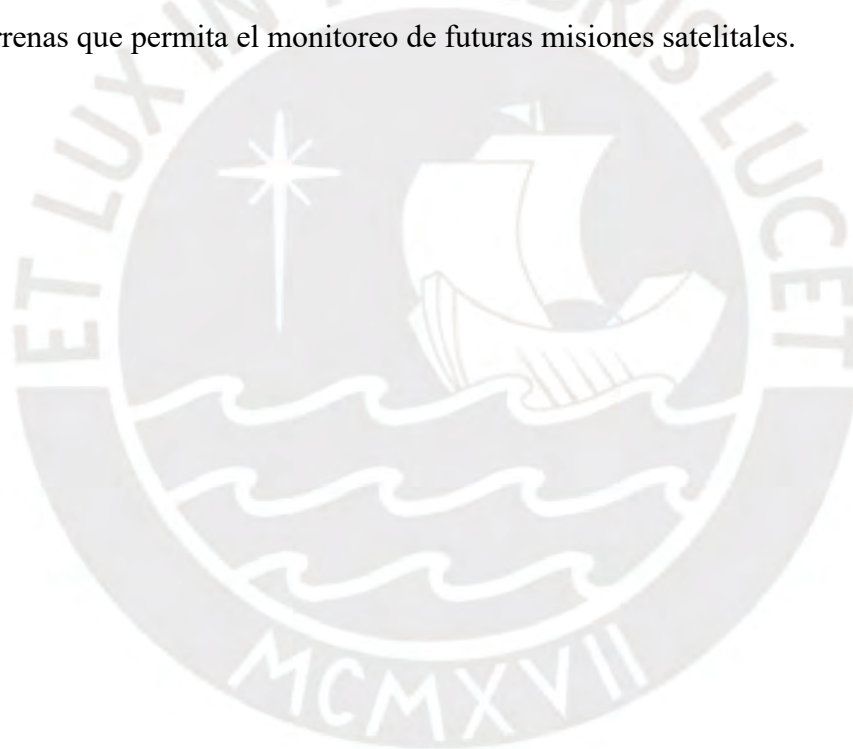
No fue hasta el desarrollo del modelo CubeSat, a inicios del nuevo milenio, que estas instituciones educativas tuvieron a la mano una forma estandarizada y más económica de diseñar satélites, lo que permitió el aumento del número de misiones satelitales promovidas por universidades e institutos. Hoy en día son cientos de instituciones educativas alrededor del mundo las que han lanzado por lo menos un satélite de pequeño tamaño, contando tanto los que siguen el estándar CubeSat como los que se basan en otros estándares más actuales.

La Pontificia Universidad Católica del Perú forma parte de esta lista desde que en 2013 lanzó sus dos satélites: PUCP-SAT1 y Pocket-PUCP [1, 2]. Estos, al igual que la gran mayoría de los satélites universitarios a la fecha, fueron diseñados para establecer comunicaciones en las bandas de frecuencia de radioaficionados, por lo que estaciones de este tipo pudieron escuchar sus transmisiones en todo el mundo e incluso, en algunos casos, ayudaron a ubicarlos luego del lanzamiento.

Un satélite universitario es diseñado para una o varias aplicaciones, entre las cuales podemos mencionar educacionales, científicas, de comunicaciones o sensado remoto [3]. Para poder cumplir con sus respectivas misiones, estos deben ser capaces de enviar las mediciones o los datos producidos a tierra, por lo que el diseño de una estación de comunicaciones capaz de

enviar, recibir y procesar las señales satelitales es tan vital como el del mismo satélite. Para realizar el diseño de estas llamadas estaciones terrenas, se debe tener en cuenta parámetros como la frecuencia del enlace de comunicaciones, protocolos de enlace, tipo de modulación o el software a utilizar para el procesamiento de las señales.

El presente trabajo trata sobre el diseño de una estación terrena modular que permita la comunicación con satélites de clase universitaria en las bandas de frecuencia de radioaficionados. Con el diseño propuesto se busca actualizar la ya existente estación terrena del Instituto de Radioastronomía de la PUCP, además de sentar las bases para la formación de una red de estaciones terrenas que permita el monitoreo de futuras misiones satelitales.



## CAPÍTULO 1

# MARCO PROBLEMÁTICO

## 1.1 Introducción a la Estación Terrena Universitaria

Una misión satelital universitaria es un tipo especial de misión satelital cuyo objetivo principal es la formación de estudiantes universitarios en materias relacionadas al despliegue de un satélite en órbita. Durante el ciclo de vida de estas misiones, los estudiantes son partícipes en los puntos críticos del desarrollo y construcción de un satélite, así como del monitoreo y control del mismo cuando este es lanzado a órbita [1].

Adicional a la construcción del satélite, en paralelo se diseña y construye la estación terrena. Esta es una estación de telecomunicaciones que permite establecer una comunicación por radio con el satélite cuando se encuentra en órbita. Ésta es generalmente dividida en tres partes: Sección de Recepción y Transmisión, Sección de Procesamiento de Señales y Sección de Procesamiento de Datos y Control.

En la Sección de Recepción y Transmisión, las señales son transmitidas y recibidas por medio de antenas de telecomunicaciones. Estas deben ser dirigidas y alineadas con los satélites apenas son detectados, por lo que cuentan con rotores y sus respectivas interfaces de control. La Sección de Procesamiento de Señales es la que se encarga de la modulación y/o demodulación de la señal y de la aplicación del protocolo de comunicación con el que fue diseñado el satélite. Para ello, esta sección cuenta con dispositivos como moduladores, transceptores y controladores de nodo terminal. Finalmente, la Sección de Procesamiento de Datos y Control se compone de computadoras con software dedicado al manejo de los datos recibidos, la producción de

comandos a enviar y el control del hardware de la estación.

## 1.2 El proyecto PUCP-SAT1

El lanzamiento de los primeros satélites peruanos, PUCP-SAT1 y Pocket-PUCP, marcó el ingreso del Perú a la era espacial. Este proyecto tuvo que empezar desde cero con la construcción de toda una infraestructura que permitiera el desarrollo completo de aquel. Se construyó desde la misma sede del Instituto de Radioastronomía hasta el equipamiento necesario para llevar a cabo las pruebas necesarias de los satélites [2]. Uno de estos subproyectos consistió en el diseño y la implementación de una estación terrena que permitiera la ubicación y, consecuentemente, la comunicación con los satélites.

La estación terrena del INRAS fue diseñada para comunicarse con ambos satélites haciendo uso de las bandas de frecuencia VHF y UHF, específicamente las frecuencias de 145.82 MHz y 437.82 MHz, y empleando dos modos de comunicaciones: radio por paquetes (protocolo AX.25 y modulación AFSK) y código Morse (modulación OOK/ASK) [2]. Ambos enlaces proveen una comunicación que, a pesar de ser de baja velocidad (1200 bps para radio por paquetes, 12 wpm para OOK), fueron suficientes para cumplir con los objetivos de la misión.

Con miras al desarrollo de nuevos proyectos satelitales, se busca que la estación terrena esté preparada para el monitoreo de nuevos satélites aparte del PUCP-SAT1 y el Pocket-PUCP. Por lo tanto, es necesaria una actualización de la estación terrena del Instituto de Radioastronomía que permita una mayor flexibilidad y adaptabilidad del sistema.

## **1.3 Estado del arte de estaciones terrenas**

### **1.3.1 Bandas de Frecuencia**

Uno de los puntos a tomar muy en cuenta en un proyecto de comunicaciones satelitales es la banda de frecuencias a utilizar para el enlace satélite-estación terrena. Este debe alinearse a las regulaciones del espectro electromagnético establecidas por autoridades tanto nacionales como internacionales. En el caso de las misiones satelitales desarrolladas por universidades, al formar parte de la categoría “radioaficionado”, pueden escoger entre las bandas de frecuencia licenciadas por la Unión Internacional de Radioaficionados (IARU), dependiendo de la región a la que pertenezca (regiones 1, 2 o 3), según esta organización [4].

Las más utilizadas en estaciones terrenas de radioaficionados son las bandas VHF y UHF [5, 6], las que permiten una transmisión a velocidad relativamente baja, debido al reducido ancho de banda permitido. El uso de estas bandas es apto para el envío de comandos, la telemetría de baja velocidad y la recepción de la señal de faro del satélite. Para obtener una mayor tasa de transmisión, se opta por el uso de otras bandas con mayores frecuencias como la banda S [7, 8], que cuenta con un mayor ancho de banda. Esto las hace aptas para transmisión de imágenes y de datos que se acumulan rápidamente.

### **1.3.2 Dispositivos de comunicación**

De todos los componentes de una estación terrena de radioaficionados, dos de los más importantes se encuentran en la sección de comunicaciones y son el TNC y la radio. El TNC, o controlador de nodo terminal, es un equipo utilizado por radioaficionados que consta de dos partes: un microcontrolador y un módem. El microcontrolador se encarga de implementar el protocolo AX.25, que establece el uso de radio-paquetes para la transmisión de señales digitales, mientras que el módem se encarga de convertir las señales digitales en señales de audio AFSK.

Por otra parte, la radio o transceptor es un equipo cuya función es la de modular y demodular las señales que recibe del TNC o del satélite haciendo uso de una señal portadora cuya frecuencia es determinada en las especificaciones del enlace satélite-estación terrena.

En el diseño de una estación terrena de radioaficionados se pueden considerar dos derroteros: el uso de dispositivos de comunicación comerciales (también denominados COTS en inglés, *Commercial Off-The-Shelf*), o la implementación de dispositivos específicamente diseñados para las misiones satelitales supervisadas. El uso de dispositivos comerciales permiten acortar tiempos y abaratar costos, pero existe la posibilidad, aunque baja, de que se presenten problemas de compatibilidad con los datos provenientes del satélite debido a diferencias entre las propiedades del software y hardware de los equipos (en especial si se trata del TNC) [9]. Por otro lado, el diseño e implementación de equipos propios, si bien requiere de mayor tiempo, reduce la probabilidad de que se presente el problema descrito previamente. La única gran desventaja es que, al ser un equipo diseñado a medida (para una o pocas misiones), dificulta su uso para la supervisión de misiones que no se consideraron para su diseño.

En los últimos años se opta por la implementación de los dispositivos de procesamiento de señales RF en software (SDR, *software-defined radio*) [10, 11], haciendo uso de plataformas físicas prediseñadas (ej. USRP) y herramientas de programación (ej. GNU Radio) [12]. Este cambio permite el reemplazo parcial o total de los equipos físicos anteriormente mencionados, además de la rápida reconfiguración de todo el sistema haciendo cambios únicamente en el software programado.

### **1.3.3 Estaciones terrenas en la última década**

Desde la creación del estándar CubeSat a inicios del siglo XXI, el número de misiones satelitales desarrolladas en universidades e institutos ha ido en aumento, lo cual es más notorio en la última década [3]. Con ello, el número de estaciones terrenas universitarias ha ido

incrementándose ya que, como se mencionó anteriormente, son un elemento necesario para establecer comunicación con los satélites enviados. A continuación, se presentarán algunas instituciones educativas que han implementado sus propias estaciones (no se mencionará a la PUCP en esta sección debido a que su estación ya fue descrita anteriormente).

#### Instituto de Ciencia y Tecnología de Sathyabama (India)

La estación terrena de este instituto, presentada en [6], fue parte del proyecto satelital SATHYABAMASAT, el primer satélite lanzado por esta. Este es un nanosatélite que sigue el estándar CubeSat y mide la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Fue diseñada para comunicarse con el satélite en las bandas de frecuencia de radioaficionado UHF, para comandos y telemetría, y VHF para la señal de faro, haciendo uso del transceptor Kenwood TS2000. Además, utiliza software que le permite realizar el mapeo de los gases partiendo de los datos recibidos.

#### Universidad Tecnológica de Viena (Austria)

El diseño de la estación terrena de la Universidad Tecnológica de Viena se basó en dos grandes proyectos: BRITE-Constellation, una constelación de nanosatélites dedicados a la fotometría de estrellas, y GENSO, una red global de estaciones terrenas con fines educativos y de investigación. Además se buscaba que la estación pueda ser ampliada para el monitoreo de varios satélites, por lo que la estación tuvo un diseño modular que permitiera la adición del equipamiento necesario sin realizar grandes cambios [8]. La estación se diseñó para establecer comunicaciones en las bandas de frecuencia VHF, UHF y banda S, tanto en frecuencias de radioaficionados como científicas, y con capacidad de utilizar dispositivos comerciales o diseñados a medida.

#### Universidad de Bohemia Occidental (República Checa)

La estación de esta universidad fue construida para monitorear inicialmente al satélite PilsenCUBE, el cual fue diseñado para pruebas de tecnologías pero no pudo ser lanzado por falta de fondos [13]. Unos años más tarde, el diseño fue actualizado para establecer comunicaciones con el satélite VZLUSAT-1, que fue diseñado con el mismo propósito. La estación terrena hace uso de dispositivos comerciales para la comunicación en bandas VHF y UHF, además de una SDR para la comunicación en banda S [7]. Luego de unos años de operación, se ha propuesto un rediseño de la estación en el que se plantea el reemplazo del hardware de radio por SDRs para cada banda de frecuencias utilizada, lo que facilitaría la adaptación de aquella a otras misiones.

Universiti Teknologi MARA, UiTM (Malasia)

El proyecto satelital que desarrolló esta institución fue parte del proyecto BIRDS-2, un proyecto grande promovido desde Japón que apoya a diferentes países a desarrollar y lanzar su primer satélite. La estación de la UiTM ahora forma parte de la red de estaciones BIRDS, junto con estaciones de países como Ghana, Filipinas, Mongolia o Bangladesh. Esta fue diseñada para comunicarse con los satélites de BIRDS-2 en las bandas de frecuencia VHF y UHF, utilizando dispositivos como el TNC Kantronics KPC-9612+ y el transceptor ICOM 9100 [5]. Además, es capaz de recibir imágenes de los satélites de clima de NOAA.

## **1.4 Justificación**

Los satélites pequeños no pueden diseñarse para enviar o recibir señales de gran potencia debido a su tamaño, por lo que, para facilitar la comunicación con sus estaciones terrenas, estos suelen ser posicionados en órbita terrestre baja (LEO), entre 200 y 2000 km aproximadamente (límites exactos no definidos) [8, 11]. A esas alturas, las señales recorren una menor distancia y, en consecuencia, pierden menos potencia. Esto inevitablemente lleva a que estos satélites orbiten el planeta a gran velocidad y varias veces al día (pueden dar una vuelta completa al planeta en aproximadamente 90 minutos).

Un problema que esto acarrea es que los satélites universitarios no llegan a establecer contacto con las estaciones terrenas por mucho tiempo, lo cual lleva a que estas últimas apenas lleguen a ser utilizadas alrededor del 3 % del tiempo total de la misión satelital [14]. Esto es una clara desventaja del uso de una única estación terrena para una misión, lo que afecta principalmente a la que producen y requieren de grandes cantidades de información.

La mejor alternativa de solución a este problema es el establecimiento de una red de estaciones terrenas que permita el seguimiento de un satélite por una mayor cantidad de tiempo y en consecuencia, se obtenga una mayor cantidad de datos disponible respecto de una misión [11]. Además, debido a la gran cantidad de tiempo disponible de una estación, esta puede utilizarse para el monitoreo de otros satélites de clase universitaria producidos por otras instituciones, lo cual aumenta la eficiencia individual de cada estación y abre las puertas a colaboraciones entre instituciones.

Para que todo eso sea posible, la estación debe ser capaz de adaptarse a nuevas misiones satelitales sin tener que realizar muchos cambios, por lo que un diseño modular es el más conveniente para las estaciones pertenecientes a una red. Un ejemplo de esto son las estaciones que formaron parte de GENSO (*Global Educational Network for Satellite Operations*) [8, 14], las cuales además de ser rápidamente adaptables, apoyaron a la educación e investigación por parte de los estudiantes.

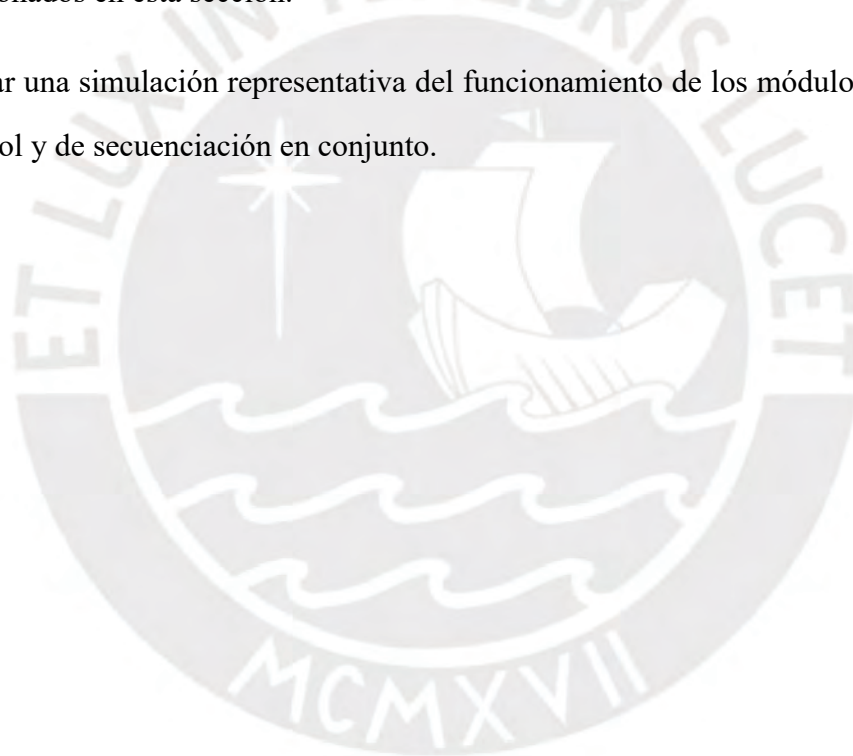
## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo principal**

Diseñar una estación terrena con estructura modular para el monitoreo de satélites de clase universitaria.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- Definir las secciones de la estación de acuerdo a los requerimientos técnicos de las operaciones realizadas en una estación terrena.
- Diseñar las secciones de radiofrecuencia y de procesamiento de señales, además de la distribución de los componentes seleccionados y esquematizados para cada sección.
- Diseñar la sección de datos y control, además de la distribución de los componentes seleccionados en esta sección.
- Realizar una simulación representativa del funcionamiento de los módulos de selección y control y de secuenciación en conjunto.



## CAPÍTULO 2

# CONCEPTOS DE DISEÑO

Para el diseño de la estación terrena, se ha tomado en cuenta las normas y regulaciones que esta debe seguir para funcionar sin interferir a ningún otro servicio que utilice ondas de radio, además de asegurarse que cumpla con las funciones estándar de toda estación terrena. En el presente capítulo se definen los principales procesos que realiza una estación terrena para monitorear un satélite. Además, se presenta al Servicio Satelital de Radioaficionados, servicio que, desde los primeros satélites de clase universitaria, ofrece y gestiona el uso de sus frecuencias asignadas por parte de aquellos. Finalmente se realiza un acercamiento al diseño modular, ya que ese es uno de los enfoques principales del trabajo.

## 2.1 Procesos realizados en una Estación Terrena

Para que la estación terrena realice el seguimiento adecuado del satélite supervisado, esta sigue una serie de procesos. Estos se pueden agrupar en dos categorías: procesos de monitoreo y control del satélite y procesos de manejo de carga útil.

### 2.1.1 Procesos de Monitoreo y Control del Satélite

Es un conjunto de procesos cuyos objetivos son el control y supervisión del estado del satélite y su carga útil, con el fin de lograr los objetivos de la misión satelital.

- *Rastreo:*

Es el primer proceso que realiza una estación terrena para establecer contacto con el

satélite supervisado. Se divide en tres subprocesos:

- Predicción de trayectoria: Cálculo previo de la trayectoria del satélite. Permite dirigir las antenas al punto donde aparecerá el satélite. Se realiza antes del paso de este sobre la estación.
- Seguimiento de trayectoria: Monitoreo de la posición del satélite. Permite redireccionar las antenas constantemente para mantener el enlace con el satélite. Se realiza durante el paso de este sobre la estación.
- Corrección de corrimiento Doppler: Cálculo del corrimiento de la frecuencia portadora debido al efecto Doppler producido por el movimiento del satélite.

Como se explicó anteriormente, los satélites de radioaficionados utilizan señales de identificación de radioaficionados para que la estación terrena pueda discernir entre los cientos de satélites que orbitan el planeta. Estos consisten en códigos alfanuméricos que corresponden a los identificadores de los operarios encargados del satélite.

#### ■ Telemetría y Comando:

Este proceso consiste en el trabajo conjunto de dos subprocesos: la telemetría y el envío de comandos, los cuales son complementarios. La telemetría es el proceso de recepción de datos provenientes del satélite, los cuales son generados por sensores y/o por cámaras (imágenes y/o video). Los datos que llegan a la estación pueden ser “data cruda” (raw data) o datos procesados, lo cual depende del diseño del satélite y de la carga útil del mismo [7]. Por otro lado, el envío de comandos es el proceso de envío de señales de control que responden a la información brindada por aquellos aparatos de medición.

Gracias a la telemetría, se obtienen datos relacionados a los objetivos de la misión. Estos dependen exclusivamente de la carga útil del satélite y pueden ser imágenes satelitales, mediciones espectrométricas, fotométricas, propiedades de materiales, entre otros. El uso de ambos procesos en conjunto permite conocer y controlar parámetros del satélite como:

- Orientación y estabilidad
- Temperatura interna
- Corrientes y voltajes
- Estado de baterías
- Modo de trabajo, entre otros.

### 2.1.2 Procesos de Manejo de Carga Útil

Es el conjunto de procesos que se encarga de la supervisión del experimento realizado en la carga útil enviada en el satélite. Gracias a estos procesos, se obtienen datos relacionados a los objetivos de la misión, cuyo tipo dependen exclusivamente de la carga útil.

#### ■ *Descarga de Datos:*

Es el proceso por el cual se obtienen las mediciones realizadas por la carga útil. La adquisición de dichas mediciones puede realizarse a través del mismo canal en el que se realiza la telemetría o por medio de un canal diferente. Ello depende en mayor parte de la configuración de la carga útil que se esté monitoreando y de la cantidad de información que se desea recibir en un periodo de tiempo.

#### ■ *Procesamiento de Datos*

Es el proceso que convierte los datos recibidos en información que se muestra al usuario a través de una interfaz. La complejidad de los algoritmos de transformación de datos depende del nivel de preprocesamiento realizado en el satélite. Si estos datos son procesados en el computador a bordo del satélite, entonces el manejo de datos en la estación terrena puede simplificarse en recoger datos y mostrarlos en una interfaz. Por el contrario, si lo que se recibe es “raw data”, entonces se requiere de un procesamiento más profundo que permita transformar esta data en información útil.

Según Lowe et al. [15], de acuerdo a la complejidad del procesamiento de los datos, la información extraída puede clasificarse, como mínimo, en tres niveles:

- Nivel 0: Datos obtenidos luego de pasar por una primera capa de procesamiento. No son directamente mostrados. Ej.: Serie de bits obtenidos a partir del desempaqueado de radiopaquetes.
- Nivel 1: Datos que muestran información básica de las mediciones. Ej.: Identificador del satélite.
- Nivel 2: Datos que muestran información de mayor profundidad a partir de los datos de Nivel 1. Ej.: Trayectoria predicha del satélite.

## **2.2 Servicio Satelital de Radioaficionados**

Según la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones, o ITU, por sus siglas en inglés), el Servicio Satelital de Radioaficionados, técnicamente llamado “Servicio de Aficionados por Satélite”, es un servicio de comunicaciones por radio que hace uso de satélites como estaciones espaciales, realizado por radioaficionados, que son “personas debidamente autorizadas que se interesan en la radiotecnía con carácter exclusivamente personal y sin fines de lucro” [16] y cuyos objetivos son la instrucción individual, la intercomunicación y los estudios técnicos.

Los operadores de las estaciones terrenas que pertenecen o se benefician del Servicio deben contar con licencias de radioaficionados otorgados por la institución correspondiente en cada país [17]. Las identificaciones asignadas a estas licencias serán utilizadas en el envío y recepción de datos tanto por la estación como por el satélite monitoreado.

### **2.2.1 Frecuencias Atribuidas al Servicio**

El Servicio Satelital de Radioaficionados, como todos los demás servicios que hacen uso del espectro electromagnético, está sujeto a las normas de atribución de frecuencias dadas por la

UIT, normas que las instituciones gubernamentales de cada país se encargan de hacer cumplir. En el caso de Perú, la entidad gubernamental es el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), quien ha elaborado el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias, en el que se indica las frecuencias habilitadas para los diferentes servicios existentes en el país [18].

Además de la distribución hecha por la UIT, la IARU (*International Amateur Radio Union*, Unión Internacional de Radioaficionados) adicionalmente distribuye el espectro atribuido a los radioaficionados entre todos los servicios que estos ofrecen [4]. La Tabla 2.1 presenta algunas de estas frecuencias y su respectiva denominación según la IEEEE.

Bandas de Frecuencias (IEEEE)	Rango de Frecuencias (MHz)	Aplicaciones
VHF	144-146	Uso común
UHF	435-438	
L	1260-1270	Uso en caso de congestión
S	2400-2450	
X	10450-10500	Uso experimental

Tabla 2.1: Frecuencias habilitadas para el servicio de aficionados por satélite. Se ha omitido las bandas de frecuencia menos utilizadas. Adaptada de [4].

Las sociedades miembros de esta organización velan por el cumplimiento de esta distribución en cada país, siendo el Radio Club Peruano el encargado en nuestro país. Las instituciones que tengan planeado lanzar un satélite, deben coordinar con esta entidad y con el MTC para poder hacer uso de una de las frecuencias habilitadas para el Servicio [17].

### 2.2.2 Protocolo AX.25

El protocolo AX.25 es considerado un protocolo de la capa de enlace (según el modelo OSI, aunque AX.25 es más antiguo que este modelo) diseñado para comunicaciones de

radioaficionados, el cual establece el uso de radio-paquetes para la transmisión de datos. Este protocolo es derivado del estándar X.25 para comunicaciones por conmutación de paquetes, ya en desuso, y actualmente es uno de los más usados por el servicio satelital de radioaficionados [19].

La trama de un radio-paquete cuenta con seis campos que se muestran en la Figura 2.1. Estos son:

- **Bandera:** Secuencia de bits ubicada al inicio y final de la trama que delimitan los radio-paquetes (0x7E). Para evitar que esta secuencia se repita en el resto de la trama se agrega un bit '0' luego de cinco bits '1' (*bit-stuffing*).
- **Direcciones:** Secuencia que identifica tanto destinatario como fuente a través de identificaciones de radioaficionados, los cuales consisten en códigos alfanuméricos.
- **Control:** Secuencia que identifica el tipo de trama enviada y se encarga del mantenimiento del enlace.
- **PID (*Protocol Identifier*):** Secuencia que identifica el tipo de protocolo de capa 3 se usa en la transmisión. Si no se usa alguno, la secuencia de bits es 0xF0.
- **Información:** En este campo está la información que se va a transmitir. La longitud de este campo es múltiplo de un octeto y la máxima longitud es de 2048 bits.
- **FCS (*Frame-Check Sequence*):** Secuencia que sirve para la detección de errores. Se utiliza el polinomio generador CRC-16-CCITT ( $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ ) para generar esta secuencia.

Flag	Address	Control	PID	Info	FCS	Flag
01111110	112/224 Bits	8/16 Bits	8 Bits	N*8 Bits	16 Bits	01111110

Figura 2.1: Trama de un radio-paquete AX.25.

Como se explicó en el capítulo anterior, existe un equipo diseñado específicamente para implementar este protocolo: el controlador de nodo terminal o TNC (*Terminal Node Controller*). Los proyectos satelitales universitarios suelen utilizar TNCs comerciales de marcas como Kantronics [5] o Kenwood (algunos modelos de radios incluyen módulos TNC) [6, 20] para reducir costos, pero también pueden ser desarrollados por los mismos participantes del proyecto, ya sea por hardware [9] o software [10].

El uso de este protocolo es una de las bases en el diseño de la estación terrena, el cual también deberá ser implementado en las misiones satelitales que vayan a ser monitoreadas por esta.

## 2.3 Diseño modular

El diseño modular es un método de diseño que consiste en organizar de manera eficiente un sistema complejo, separándolo en partes denominadas módulos. Estos están agrupados siguiendo diversos criterios, tales como similitud de funciones, compartición de interfaces, frecuencia de cambio de componentes, etc [21].

Este método le otorga tres principales características a un sistema:

- Flexibilidad: Los componentes agrupados en un módulo pueden ser cambiados o modificados sin afectar al sistema completo.
- Capacidad de mejora: Se puede cambiar o añadir nuevas características al sistema agregando módulos con diferentes funcionalidades o reemplazando unos módulos por otros.
- Desarrollo concurrente: La determinación de los módulos permite que cada uno de estos pueda ser desarrollado por separado, reduciendo el tiempo de implementación del sistema completo.

Para poder modularizar un sistema, uno debe conocer con suficiente profundidad el funcionamiento de este. Además, se debe evitar agrupar demasiados componentes en un solo módulo, porque se pierde las ventajas que da este método.

La modularización de la estación terrena de radioaficionado es uno de los enfoques principales de este trabajo, ya que se desea que aquella tenga las características mencionadas. Además, obtiene adicionalmente la capacidad de monitoreo de múltiples satélites con solo agregar los módulos correspondientes [8]. Esto le permite a la estación terrena, en el caso de estar a cargo de satélites con diferentes características, mantenerse activa por una mayor cantidad de tiempo.



## CAPÍTULO 3

# DISEÑO DE LA ESTACIÓN TERRENA MODULAR

En el presente capítulo, se desarrolla el diseño propuesto de la estación terrena. Para ello, se va a seguir estos pasos:

- Establecimiento de los requerimientos técnicos, tanto del enlace de comunicaciones, como de los procesos definidos.
- Definición de las secciones de la estación terrena, en base a los requerimientos.
- Selección y diseño de los dispositivos a utilizar en cada sección.

## 3.1 Requerimientos y consideraciones

### 3.1.1 Enlace de Comunicaciones

- Bandas de frecuencia

Gran parte de los satélites universitarios utilizan tres de las bandas de la categoría de radioaficionados: VHF, UHF y banda S. Por ello, la estación terrena se diseña para poder trabajar inicialmente en estas tres bandas. Se contempla el uso de las bandas VHF (144 – 146 MHz) y UHF (435 – 438 MHz) tanto para transmisión y recepción, mientras que se propone que la banda S (2.40 – 2.45 GHz) solo se use en modo recepción.

- Tipos de modulación

Algunos de los modos de comunicación permitidos por la IARU en las bandas de frecuencia del Servicio Satelital de Radioaficionados son el de banda lateral única (BLU, o SSB), onda continua (CW), frecuencia modulada (FM) y modos digitales (DM). Los tres primeros son ejemplos de modulación analógica, mientras que el último se refiere a los de modulación digital.

El diseño de la estación contempla el uso de tres de estos modos: CW, DM y FM, que son los más utilizados por las misiones satelitales universitarias. El modo CW, el cual utiliza modulación OOK (*on-off keying*), se utiliza para la recepción de la señal de radiofaro (*beacon*) del satélite, la cual se transmite en código Morse, mientras que la modulación AFSK (*Audio Frequency-Shift Keying*), uno de los DM, es implementado en el modem de un TNC.

- Protocolo de comunicaciones

Se permite que un satélite pueda utilizar las bandas de frecuencia del Servicio Satelital de Radioaficionados, siempre y cuando el proyecto cuente, por lo menos, con un elemento relacionado a la radioafición en su propuesta. Es por ello que se plantea que la estación terrena use el protocolo AX.25, el cual, como se vio anteriormente, es uno de los protocolos más utilizado para comunicaciones digitales en los servicios de radioaficionados.

### 3.1.2 Procesos dentro de la estación

- Rastreo

Para este proceso, se plantea que la estación cumpla con los siguientes requisitos:

- Capacidad de predicción de trayectoria de un determinado satélite haciendo uso de datos de los elementos orbitales codificados en formato TLE (*two-line element*).

- Capacidad de seguimiento de trayectoria a través del alineamiento continuo de las antenas, haciendo uso de rotores.
  - Capacidad de corrección del desplazamiento de frecuencia por efecto Doppler, a través del control fino de las frecuencias portadoras de los transceptores.
- Telemetría y Comando

Para este proceso, se plantea que la estación cumpla con los siguientes requisitos:

- Capacidad de adquisición de parámetros de estado del satélite a partir de radiopaquetes AX.25 y código Morse.
  - Capacidad de envío de comandos desde una computadora por medio de radiopaquetes AX.25.
- Descarga de Datos

Para este proceso, se plantea que la estación cumpla con el siguiente requisito:

- Capacidad de adquisición de información de la carga útil del satélite a partir de radiopaquetes AX.25.

## 3.2 Diseño de la estación

El diseño propuesto de la estación se muestra en la Figura 3.1. Como se puede observar, la estación será dividida en tres grandes secciones: Sección de Radiofrecuencia, Sección de Procesamiento de Señales y Sección de Datos y Control. A continuación, se explicará el diseño de cada una de ellas.

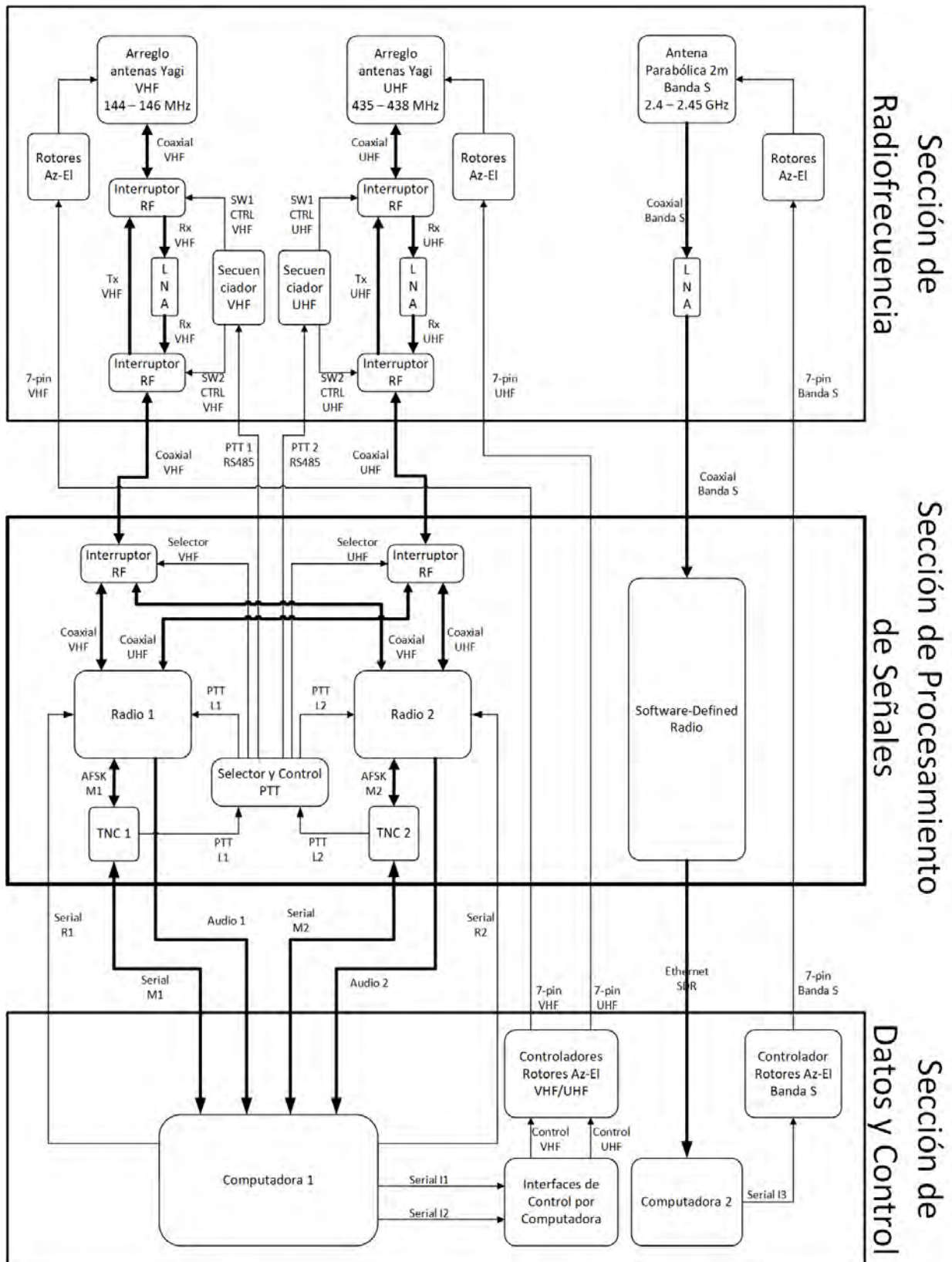


Figura 3.1: Esquema completo del diseño propuesto para la estación terrena.

### 3.2.1 Sección de Radiofrecuencia

En esta sección se ubican las antenas de comunicaciones con sus respectivos rotores para realizar el seguimiento de trayectoria del satélite, además de interruptores RF para la conmutación entre las vías de transmisión y de recepción.

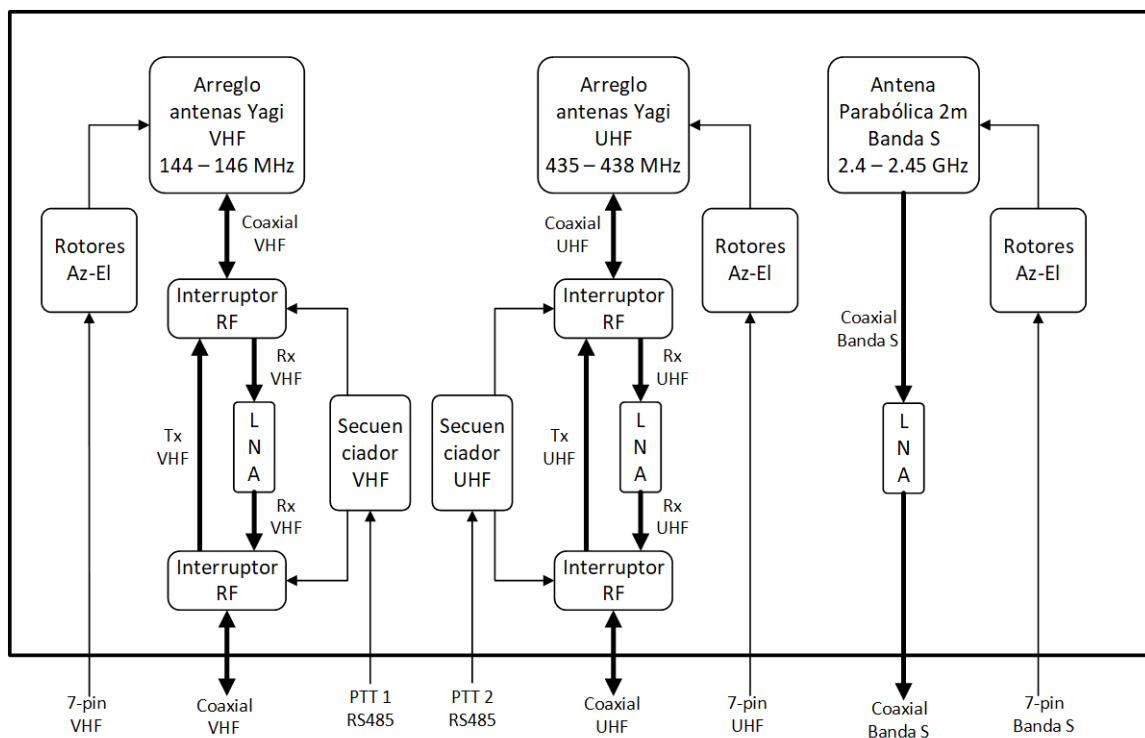


Figura 3.2: Distribución de componentes de la Sección de Radiofrecuencia.

En la Figura 3.2 se propone el uso de tres líneas de comunicación para las tres diferentes bandas de frecuencia, por lo que se cuenta con tres antenas distintas. El INRAS dispone de arreglos de antenas Yagi-Uda diseñados para comunicaciones en VHF y UHF, además de una antena parabólica de 2 m destinada a comunicaciones en banda S, la cual aún debe ser estructurada.



Figura 3.3: Arreglos de antenas Yagi para comunicaciones en VHF (izquierda) y UHF (derecha)

Además, se dispone de dos pares de rotores azimut-elevación de la marca Yaesu, modelo G-5500 para los arreglos de antenas Yagi. Estos rotores están conectados a sus respectivas unidades de control, las cuales se ubican en la Sección de Datos y Control, por medio de cable de 5 conductores con conector de 7 pines.



Figura 3.4: Par de rotores azimut-elevación *Yaesu* G5500 del arreglo de antenas Yagi para banda UHF.

Cada una de las antenas Yagi está conectada, a través de un cable coaxial con conectores N o

PL-259, a un módulo conmutador conformado por un par de interruptores RF y un amplificador de bajo ruido (LNA) conectados como se muestra en la Figura 3.2. Esto permite separar la línea de transmisión (conexión directa) de la de recepción (conexión a través del LNA). Por otro lado, la antena parabólica se conecta directamente al SDR de la Sección de Procesamiento de Señales, a través de cable coaxial un LNA, debido a que se encuentra únicamente en modo recepción.

Para las líneas de recepción de las bandas VHF y UHF se utilizan amplificadores de bajo ruido (LNA, *low-noise amplifier*) de la marca *Advanced Receiver Research* (Ar<sup>2</sup>), modelos P144VDG para VHF y P432VDG para UHF, con anchos de banda de 7 y 30 MHz y ganancias de 24 y 20 dB, respectivamente. Estos se conectan entre los interruptores mediante cables coaxiales con conectores BNC y se alimentan con 12 VDC.



Figura 3.5: LNA para banda UHF de Ar<sup>2</sup> (P432VDG).

Se plantea la instalación permanente de ambos LNA en las líneas de comunicación de las bandas VHF y UHF, por lo que un mecanismo de conmutación entre transmisión y recepción se vuelve necesario para protegerlos. Debido a ello, se plantea la implementación de interruptores RF de naturaleza electrónica, cuya conmutación se realiza mediante una señal proveniente de un módulo 'Secuenciador'. Se observa en la Figura 3.6 que estos interruptores tienen dos señales de control: CTRL para la conmutación del interruptor y EN para la habilitación del mismo. Sin

embargo, en el esquema de la estación diseñada se omite la señal de habilitación debido a que el interruptor siempre está habilitado.

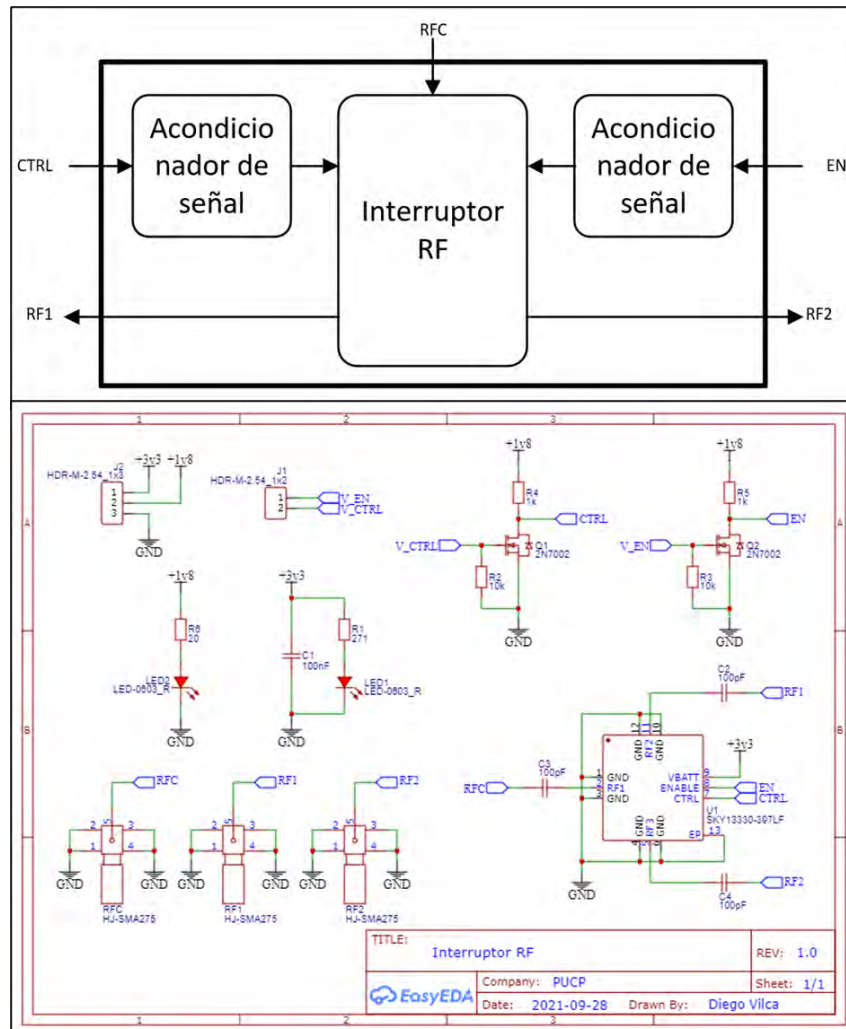


Figura 3.6: Diagrama de bloques (arriba) y diagrama esquemático (abajo) del interruptor RF.

El módulo 'Secuenciador' mencionado en el párrafo anterior también se encuentra en esta sección (se dispone uno para cada par de interruptores RF de cada línea). Este módulo se compone de dos elementos como se muestra en la Figura 3.7: un Arduino Nano, programado para el envío y recepción de comandos por medio del protocolo UART, y un convertor de UART a RS485. Este último elemento le permite comunicarse con un módulo 'Selector y Control PTT' que se describe en la siguiente sección.

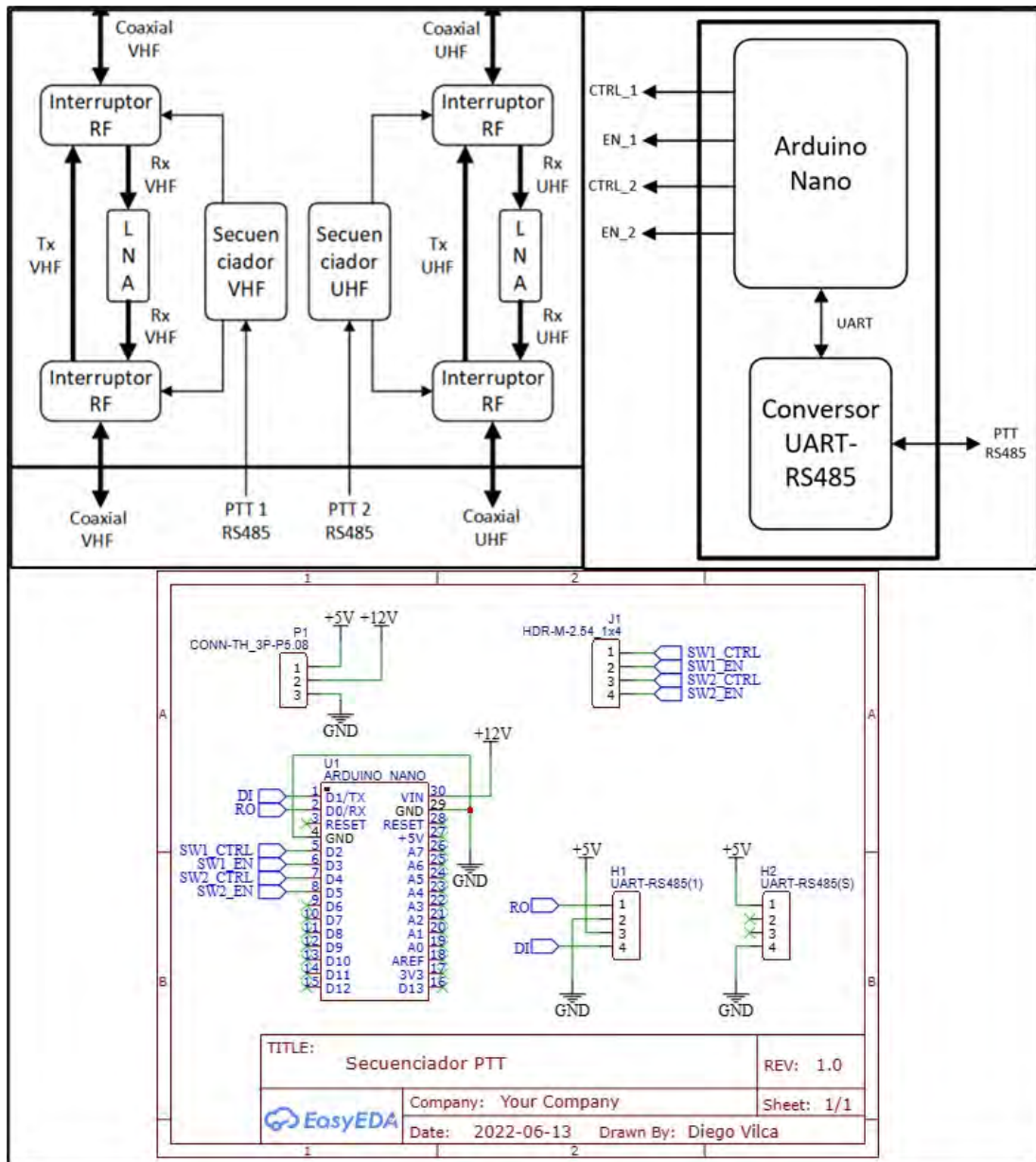


Figura 3.7: Par de módulos Secuenciadores ubicados en la Sección de Radiofrecuencia (arriba izquierda), diagrama de bloques (arriba derecha) y diagrama esquemático (abajo) del módulo.

### 3.2.2 Sección de Procesamiento de Señales

En esta sección se ubican los radios (COTS o SDR), en conjunto con los TNC. Ambos equipos permiten procesar tanto las señales RF recibidas de la Sección de Radiofrecuencia, como las señales digitales provenientes de la Sección de Datos y Control. Se cuenta también

con interruptores RF, esta vez para la selección de la línea de procesamiento (i.e. elegir el par transceptor - TNC que procesará la señal RF de cada banda de frecuencia), además de un módulo ‘Selector y Control PTT’, cuya función se explica más adelante. En la Figura 3.8 se observa la distribución de los elementos mencionados.

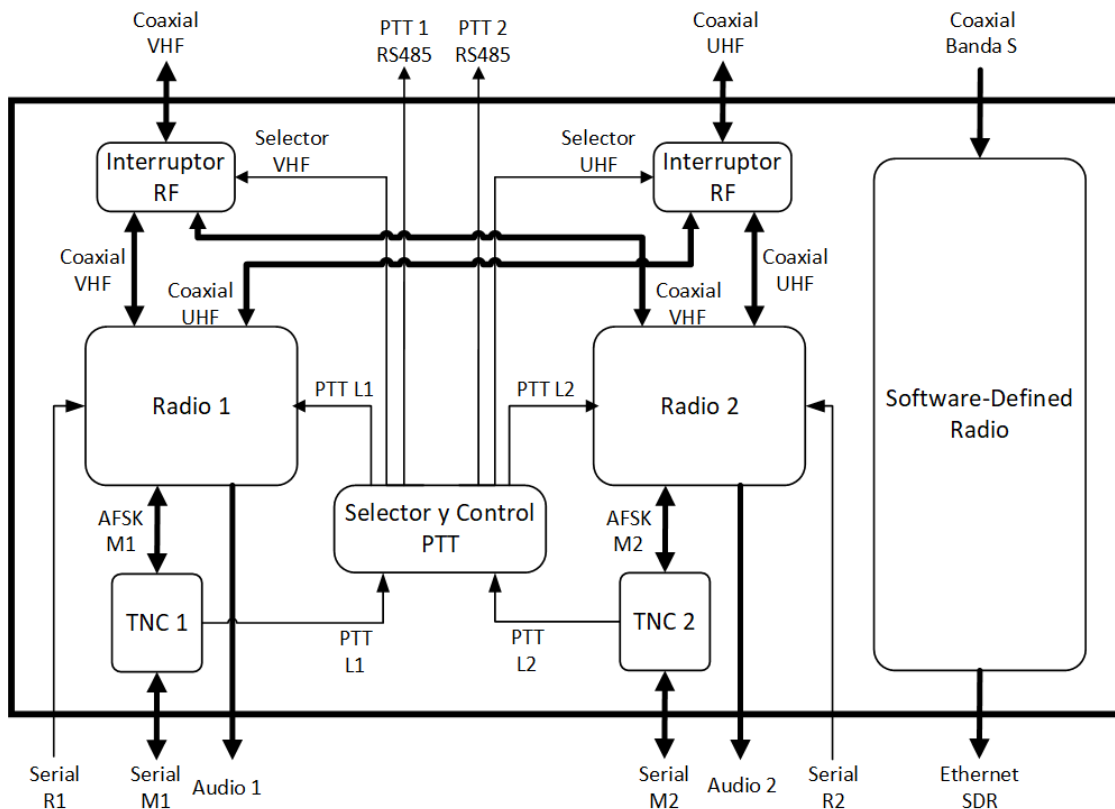


Figura 3.8: Distribución de componentes de la Sección de Procesamiento de Señales.

Se cuenta con radios de la marca *Yaesu*, modelos FT-726R y FT-847, las cuales tienen la capacidad de transmitir y recibir en las bandas VHF y UHF. Estos radios se conectan a un par de módulos interruptores RF, uno para VHF y otro para UHF, lo que permite que ambas se conecten a cada arreglo de antenas y establezcan comunicación en ambas bandas de frecuencia.

La radio FT-847 se conecta a un TNC de la marca *Timewave*, modelo PK-232 PSK, por medio de un cable de 6 conductores con conector mini-DIN de 6 pines. Adicionalmente, se conecta directamente a una computadora a través de un cable de audio para recepción de la

señal de faro en CW (modulación OOK) y a través de un cable serial en configuración cruzada o *null-modem* con conectores DB-9, convertido a USB de ser necesario, para la corrección del desplazamiento por efecto Doppler.



Figura 3.9: Tranceptores comerciales *Yaesu* modelos FT-847 (arriba) y FT-726R (abajo).

La radio FT-726R no cuenta con interfaces de control o de transmisión y recepción de datos por puertos seriales debido a su antigüedad. Por ello, esta se conecta a un receptor (no radio) definido por software (*software-defined receiver*) de la marca *RF Space*, modelo SDR-14, el cual tiene la función de analizador de espectro. Esto se consigue mediante la extracción de la señal recibida en una frecuencia intermedia de la radio (455 kHz) a través de un cable coaxial que se conecta al receptor SDR-14 con un conector SMA. El resultado de dicha configuración es que este par transceptor - receptor software puede funcionar como analizador de espectro en VHF o UHF, es decir, puede recibir señales en ambas bandas de frecuencia y mostrar un análisis espectral en una pantalla, mas no transmitir datos provenientes de una computadora.

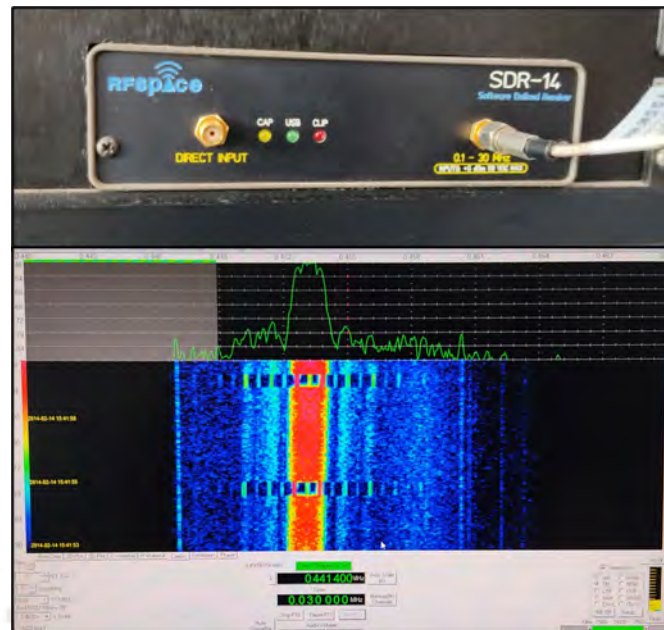


Figura 3.10: Arriba, receptor software de la marca *RF Space*, modelo SDR-14 usado en conjunto con el transceptor FT-726R para recepción. Abajo, ejemplo del funcionamiento del mencionado par transceptor - receptor software.



Figura 3.11: Controlador de nodo terminal (TNC) PK-232 PSK de la marca *Timewave*.

El PK232 PSK, al ser un TNC con software propio encargado del entramado de los datos bajo el protocolo AX.25, solo requiere de conexiones con una radio y una computadora. Esta última conexión es a través de un cable serial con conector USB.

Se explicó anteriormente que la conmutación entre transmisión y recepción es necesaria para la protección de los LNA conectados a la antena. La instalación de los interruptores RF y los módulos ‘Selectores’ en la Sección de Radiofrecuencia se complementa con el uso de un módulo ‘Selector y Control PTT’ en esta sección, cuyo diagrama se muestra en la Figura 3.12. Este módulo permite el control tanto de las conmutaciones de los interruptores en la Sección de Radiofrecuencia como de los cambios del transceptor entre transmisión y recepción. Para ello

utiliza las señales PTT (*Push-To-Talk*) que emiten los TNCs y que indican el modo en el que se encuentran estos. Adicionalmente, el módulo tiene la función de controlar los interruptores de selección de línea para seleccionar el par tranceptor - TNC que procesará la señal RF de cada banda de frecuencia, control que se realiza manualmente.

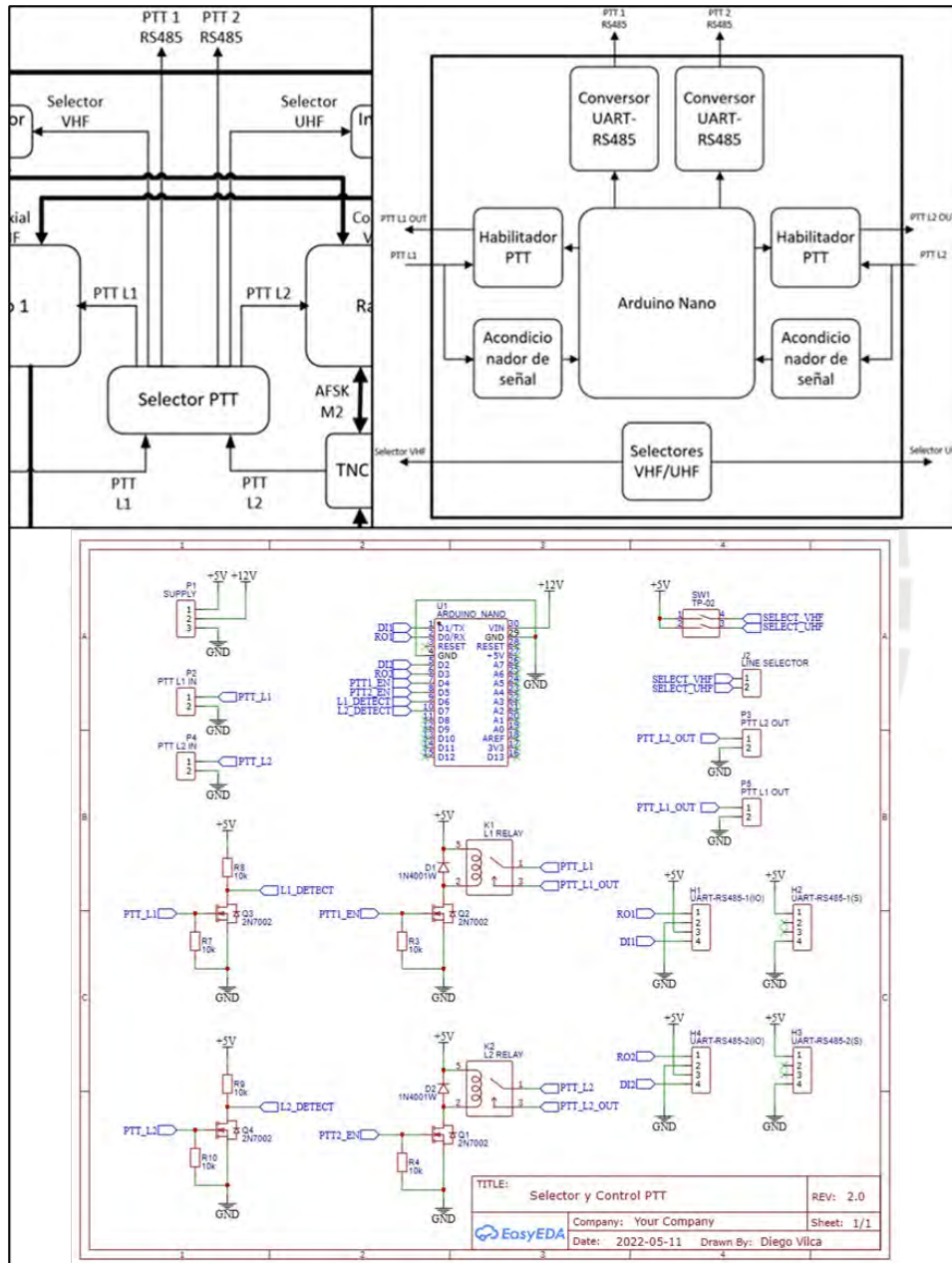


Figura 3.12: Módulo ‘Selector y Control PTT’ ubicado en la Sección de Procesamiento de Señales (izquierda) diagrama de bloques (derecha) y diagrama esquemático del módulo (abajo).

Es importante señalar que los transeptores COTS para radioaficionados no son diseñados para comunicarse a través de la banda S. Debido a esto, se opta por el uso de un SDR de la marca *Ettus Research*, modelo USRP X310, para dicho propósito, ya que este modelo puede transmitir y recibir señales de hasta 6 GHz. Este se conecta directamente a su LNA por medio de un cable coaxial con conectores SMA, y a la computadora a través de un cable Ethernet con conectores RJ-45 tanto para transmisión de datos, como para configuración.



Figura 3.13: SDR de *Ettus Research* modelo USRP X310. Los conectores RF se encuentran del lado opuesto.

### 3.2.3 Sección de Datos y Control

En esta sección, se ubican las computadoras desde las cuales se realiza el control de los componentes de la estación y el procesamiento de los datos recibidos. Adicionalmente, se ubica las unidades de control de los rotores, las cuales, dependiendo de su diseño, se conectan directamente a la computadora, a través de una conexión serial, o a través de un equipo adicional que funciona como interfaz entre los dos dispositivos.

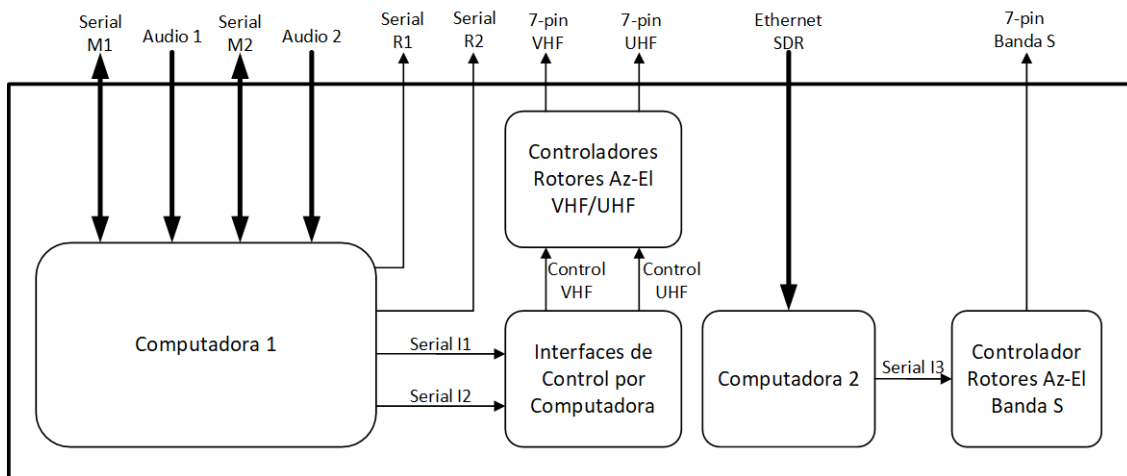


Figura 3.14: Distribución de componentes de la Sección de Datos y Control.

La estación cuenta con las unidades de control de los rotosres G-5500 para las antenas Yagi, las cuales se conectan a cada par de rotosres usando los terminales ubicados en la parte posterior de la unidad, como se muestra en la Figura 3.14. Además, se conecta a la interfaz de control por computadora por medio de un cable adaptador de conector DIN de 8 pines a conector doble de 5 pines (viene incluido con la interfaz). Las interfaces se conectan a la computadora a través de un cable serial con conector DB-9, que puede adaptarse a una entrada USB.



Figura 3.15: Parte frontal (izquierda) y parte posterior (derecha) de la unidad de control de rotosres Yaesu G-5500.



Figura 3.16: Interfaz de control por computadora desarrollada en el INRAS-PUCP.

La computadora es el equipo que se conecta a gran parte de los dispositivos de la estación (TNCs, radios, unidades de control), siendo las conexiones de varios de estos de tipo serial (RS-232 o USB). A partir de aquí, se realizan todas las acciones de control de los equipos, de comunicaciones con el satélite y de procesamiento de los datos recibidos.

Para cumplir con las tres acciones establecidas para el proceso de rastreo definidas previamente, se utilizará el programa Orbitron. Este programa de código abierto tiene la capacidad de procesar archivos de texto con datos en formato TLE para el cálculo de la trayectoria de un satélite. Además, con este programa se ejecuta un programa controlador desarrollado en el INRAS que permite controlar las frecuencias de transmisión y recepción de las radios para la corrección del desplazamiento por efecto Doppler y la orientación de los rotores.



Figura 3.17: Software controlador desarrollado en INRAS-PUCP. También se puede observar al programa Orbitron minimizado.

Para el proceso de telemetría y comando, además del de descarga de datos, se hace uso de otro programa desarrollado en el INRAS usando el lenguaje de programación Visual Basic. Este programa consiste en un terminal serial que permite la conexión con el TNC para la recepción de datos decodificados por este y el envío de comandos. Además, el programa permite el almacenamiento de la información de la comunicación con el satélite y de los datos obtenidos para su procesamiento posterior.

## CAPÍTULO 4

# SIMULACIÓN REPRESENTATIVA Y RESULTADOS

Para poder validar el diseño realizado en el capítulo anterior, se debe resaltar los beneficios que proporciona este respecto al diseño anterior. Es por ello que, en el presente capítulo, se describe el funcionamiento del sistema diseñado, tomando en cuenta todos los módulos disponibles y las mejoras respecto al diseño existente de la estación terrena del INRAS.

### 4.1 Funcionamiento general de la estación terrena

El funcionamiento del diseño propuesto se describirá en dos partes: una parte para describir el funcionamiento de los procesos, y otra para describir las características propias del diseño.

#### 4.1.1 Procesos de la estación

- Rastreo

En la computadora, el programa *Orbitron* calcula la trayectoria prevista del satélite, según los elementos orbitales obtenidos en formato TLE, y la muestra en una pantalla. Un ejemplo de su funcionamiento se puede observar en la Figura 4.1. Previo al paso del satélite por la estación, se orientan de manera manual los arreglos de antenas hacia el lugar por el que está previsto la aparición del satélite.

En el momento que, según el programa, este comienza a pasar por encima del horizonte,

el programa ordena que los rotores giren con el objetivo de que las antenas apunten hacia donde está previsto se encuentre el satélite durante todo su paso por la estación, haciendo uso del controlador software del INRAS. Además, mientras las antenas siguen la trayectoria del satélite, *Orbitron* calcula la corrección de la frecuencia de transmisión/recepción de la estación para contrarrestar el efecto Doppler, para luego enviar la frecuencia calculada a los transceptores.

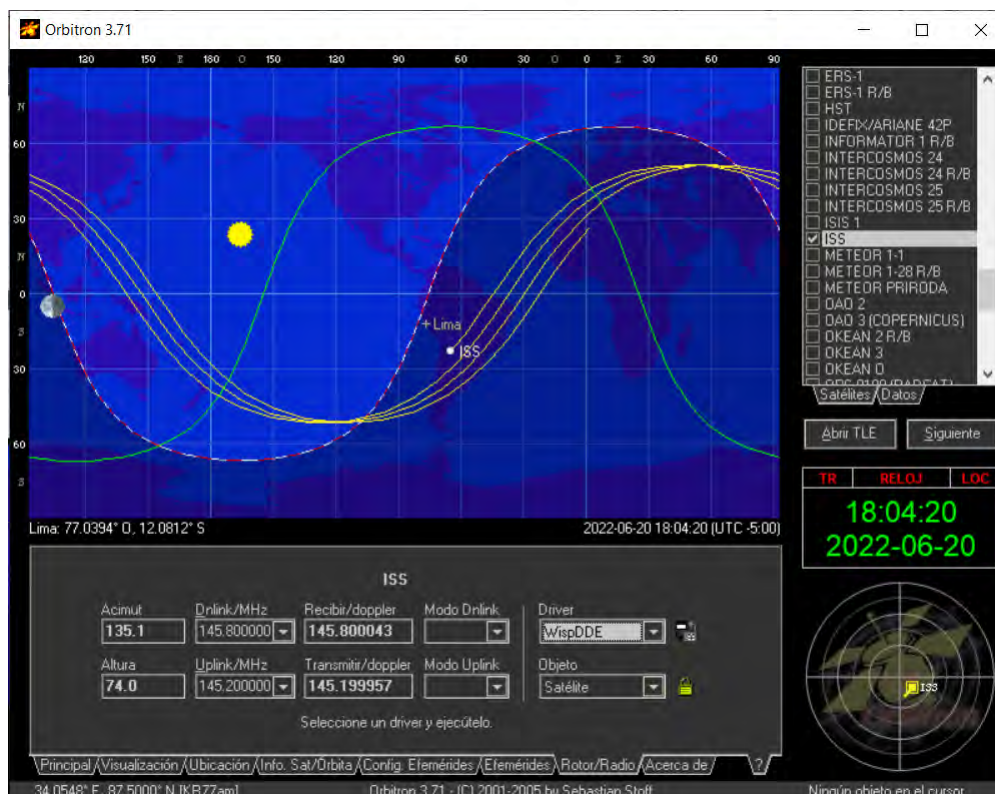


Figura 4.1: Programa *Orbitron* en ejecución. En este ejemplo, el programa realiza el rastreo de la Estación Espacial Internacional (ISS) y calcula la frecuencia de transmisión y recepción del transceptor que contrarresta el efecto Doppler producido por el movimiento del objeto rastreado.

- Telemetría y comando/Descarga de datos

Previo al comienzo del envío de comandos, los interruptores deben estar configurados de tal manera que permitan que el transceptor a utilizar pueda entrar al modo transmisión. Luego de ello, se escribe el comando que se desea enviar en el terminal serial de la computadora. Este comando se envía al TNC, el cual aplica el protocolo AX.25 y modula

la señal digital resultante en AFSK. La señal modulada es enviada al transceptor, el cual realiza una segunda modulación en FM usando el valor de frecuencia de subida recibido desde la computadora. Esta última señal se envía hacia la antena, pasando por la línea establecida por los interruptores, para ser enviada hacia el satélite.

Para recibir los datos de telemetría del satélite o los de la carga útil, el transceptor entra a modo recepción, mientras que los interruptores se configuran de tal manera que se pueda realizar la recepción. Entonces, la señal RF proveniente del satélite se recibe mediante la antena. Dicha señal pasa a través de los interruptores y llega a uno de los transceptores, el cual demodula la señal para obtener una señal modulada en AFSK. Esta señal pasa a través del TNC, el cual demodula la señal y decodifica la información usando el protocolo AX.25. Finalmente, la señal digital se recibe en la computadora.

- Banda S

La línea de comunicación para banda S está diseñada para utilizarse en modo recepción, por lo que el funcionamiento es sencillo. La señal RF en banda S es recibida por la antena parabólica y pasa por el LNA para su adecuada recepción por parte del SDR. Previamente configurado para su funcionamiento en las frecuencias de banda S, el SDR recibe la señal amplificada y la procesa para obtener la señal digital, la cual es recibida por una de las computadoras de la estación.

#### 4.1.2 Características propias de la estación

- Cambio entre transmisión y recepción

El trabajo conjunto de los interruptores RF y los ‘Secuenciadores’ de la Sección de Radiofrecuencia, más el módulo ‘Selector y Control PTT’ permiten el cambio de transmisión a recepción y viceversa para toda la estación en las bandas VHF y UHF.

El cambio de estado de los interruptores y del transceptor debe ser secuencial y retardado

para que ocurra un cambio entre líneas seguro. Con esto se evita daño en los LNA de cada línea causado por una conexión accidental entre el amplificador y el transceptor en modo transmisión. La secuenciación con retardo sigue la pauta establecida en la Figura 4.2.

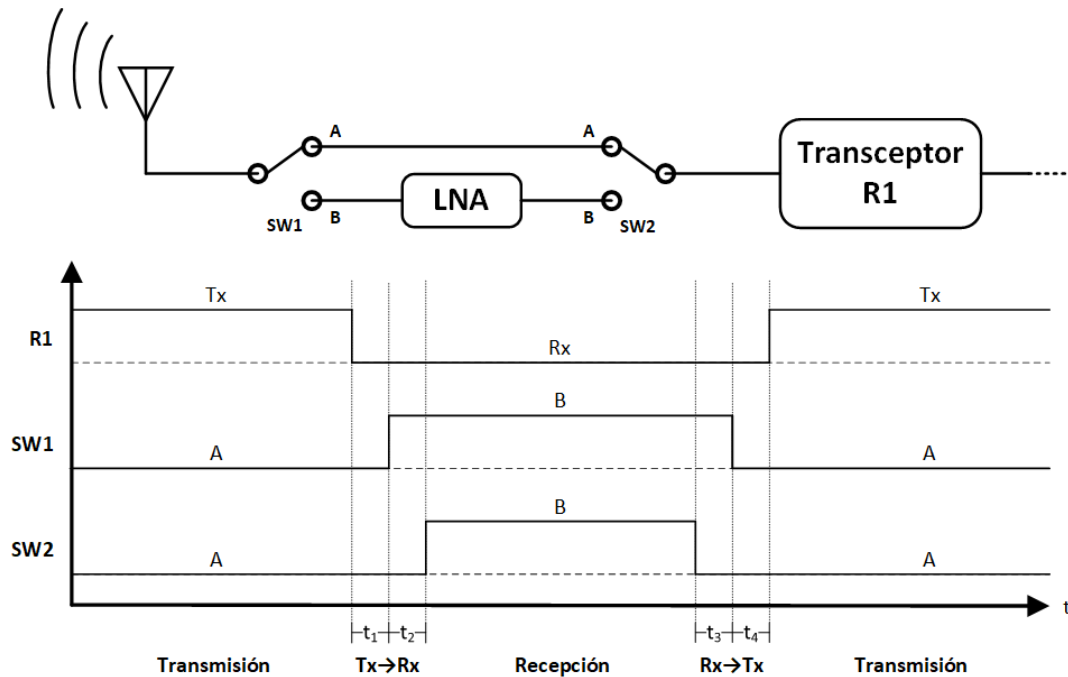


Figura 4.2: Diagrama de tiempos que describe el comportamiento de los interruptores RF y el transceptor de una línea de comunicación. Los periodos  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  y  $t_4$  deben definirse según los parámetros técnicos de los equipos.

En la Figura 4.3, se muestra el esquema de simulación de un programa de prueba realizado en el programa Proteus. Este esquema tiene el propósito de representar el cambio entre los modos transmisión y recepción de una línea de comunicación.

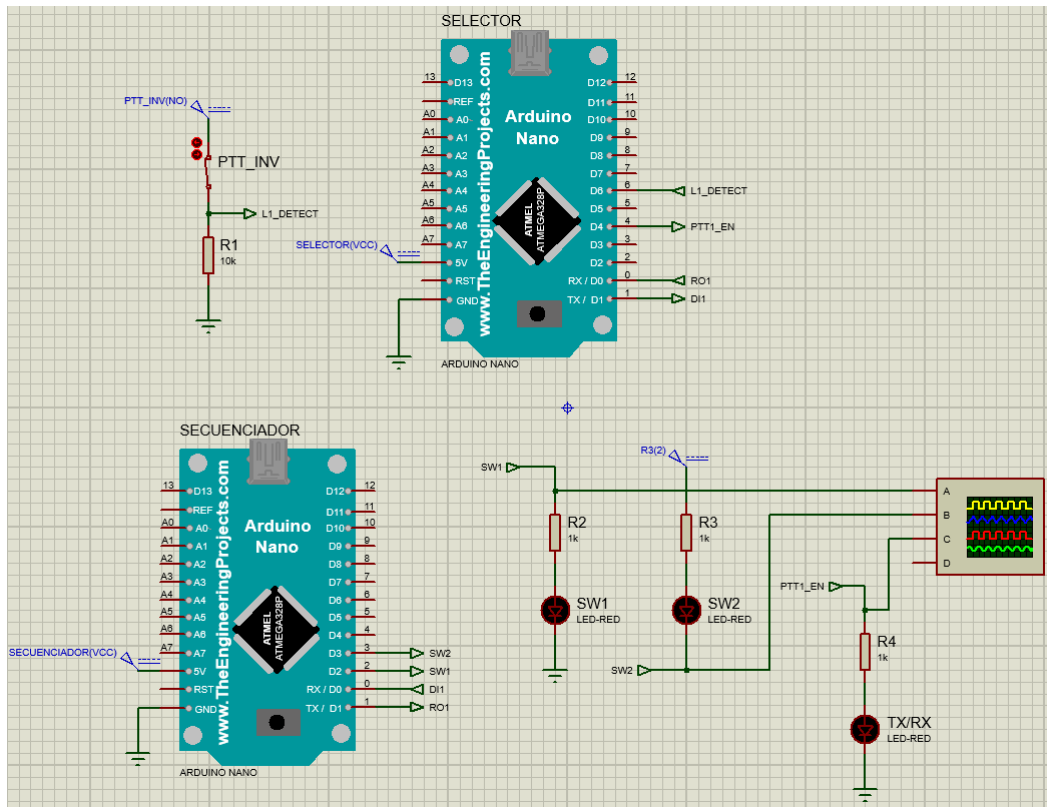


Figura 4.3: Esquema de simulación de cambio entre modo transmisión y recepción de una línea de comunicación.

La simulación presenta elementos que representan un componente de la estación. Estos son:

- Interruptor PTT\_INV: Señal invertida del PTT. Cerrado: transmisión; abierto: recepción.
- Arduino SELECTOR: Bloque ‘Selector y Control PTT’. Ubicado dentro de la estación.
- Arduino SECUENCIADOR: Bloque ‘Secuenciador’. Ubicado cerca de la antena.
- Luces LED SW1, SW2: Interruptores RF de una línea de comunicación. Ubicados cerca de la antena. Encendido: recepción (conectados a LNA); apagado: transmisión (conexión directa).
- Luz LED TX/RX: Transceptor. Encendido: transmisión; apagado: recepción

Cada uno de los Arduino Nano tiene un programa distinto que pueden ser observados en el Anexo A. Además, la simulación presenta señales que representan acciones reales de los bloques ‘Selector y Control PTT’ y ‘Secuenciador’. Estos son:

- L1\_DETECT: Detección de la señal PTT del TNC.
- RO1, DI1: Comunicación entre bloques ‘Selector y Control PTT’ y ‘Secuenciador’.
- SW1, SW2: Señales de control para los interruptores RF de la Sección de radiofrecuencia.
- PTT1\_EN: Señal PTT habilitada para conexión al transceptor.

En la Figura 4.4, se muestra que los elementos representativos de los componentes y señales de la estación mencionados se comportan del modo esperado. Además, en la Figura 4.5, se muestra la secuencia del cambio de estado de los interruptores RF conectados al LNA y del transceptor.

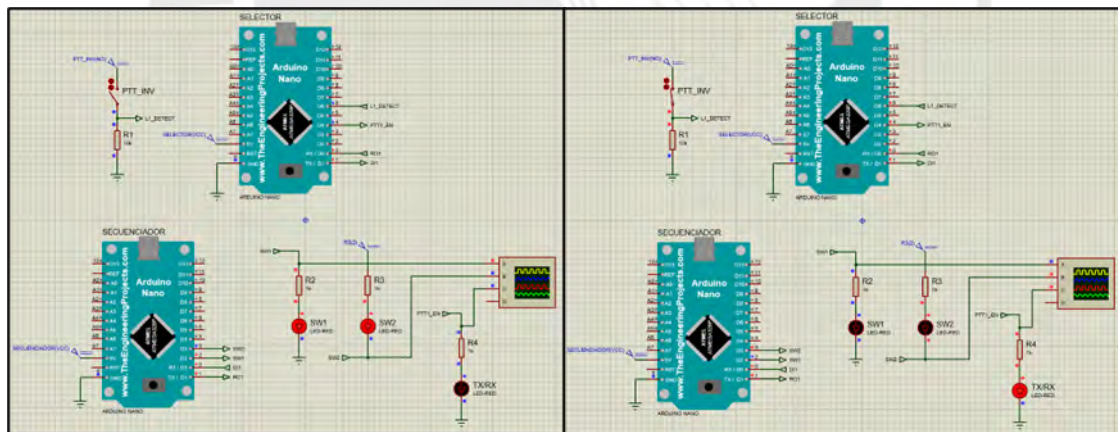


Figura 4.4: Simulación del circuito mostrado. Izquierda: Recepción. Derecha: Transmisión.

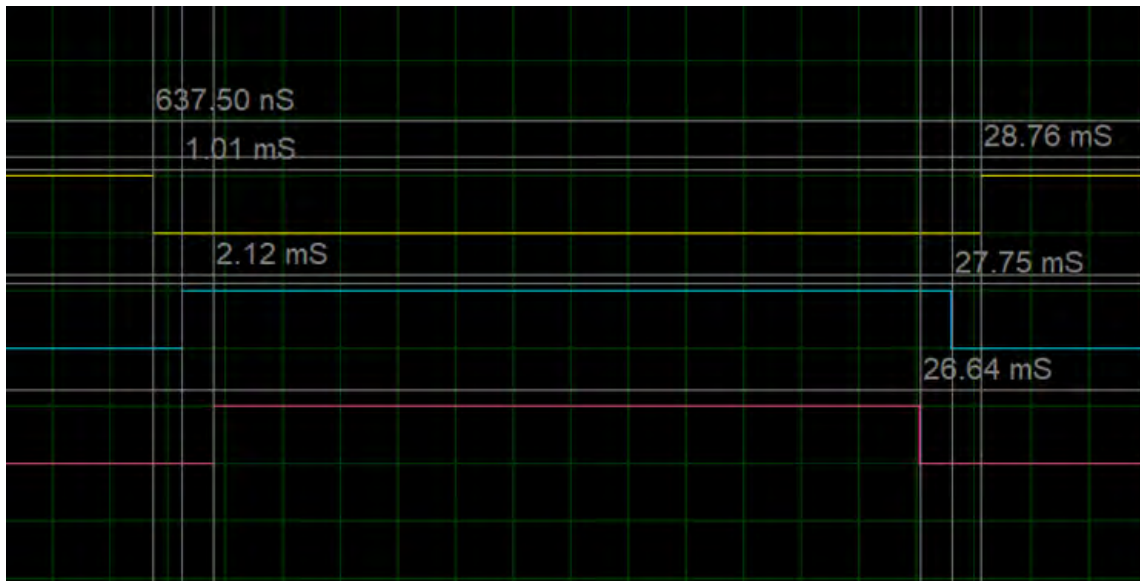


Figura 4.5: Diagrama de tiempos de la simulación realizada, con un retardo programado de 1 ms. La línea roja representa el modo de comunicación del transceptor (alto: transmisión, bajo, recepción). Las líneas amarilla y azul representan, respectivamente, a los interruptores RF conectados a la entrada y a la salida del LNA de la línea de comunicación.

En esta última figura se muestra que, previo al cambio de estado del transceptor de recepción a transmisión, se desconectan del LNA (uno después del otro) los interruptores ubicados a su entrada y a su salida, lo que evita que esta última reciba por accidente toda la potencia del transceptor cuando cambie a modo transmisión. Por otro lado, luego de que el transceptor cambia a modo receptor, los interruptores cambian de estado en orden inverso.

- Selección de líneas de comunicación

Como la mayoría de los transceptores COTS de los radioaficionados pueden trabajar tanto en VHF como en UHF, el módulo ‘Selector y Control PTT’ además cumple otra función: el emparejamiento entre línea de comunicación y par transceptor-TNC. En otras palabras, se puede seleccionar si un solo par transceptor-TNC trabaja en ambas frecuencias o si cada par trabaja en bandas de frecuencia diferentes. Esta selección no es necesaria para la banda S debido a que en esta banda trabaja únicamente el SDR.

Las salidas del módulo correspondientes a la selección de líneas de comunicación, las cuales se observan en la Figura 3.12, controlan el estado de los dos interruptores RF de la Sección de Procesamiento de Señales. Esta selección se realiza de manera manual, ya que el módulo es accesible al personal operativo de la estación.

## 4.2 Comparación con estación terrena INRAS

La estación terrena del INRAS, diseñada y construida a la par con el satélite PUCP-SAT1, tiene las especificaciones mostradas en las Figuras 4.6 y 4.7.

Ground Station	4-yagi array, 9 element circular polatization VHF (left+right). 4-Yagi array, 17 element circular polarization (left+right) 8 meter parabolic dish / UHF
Communications equipment	TNC PK-232, 45W UHF/VHF transceiver, SDR with spectral analysis
Tracking software	Local development, position tracking, automatic doppler shift correction

Figura 4.6: Características de la estación terrena del INRAS. Extraído de [2].

Satellite Series	Satellite Name	Size (cm)	Mass (g)	Link Band	Frequency (MHz)	Tx Pow. (mW)	Comm. type	Data type/ Modulation
GND	PUCP Station			UP VHF Tx	145.82	45,000	Command	AX.25/AFSK/narrow FM
				DN VHF Rx	145.82			
				UP UHF Tx	437.82	40,000	Telecomm	OOK/12wpm/90% (*)

Figura 4.7: Especificaciones de frecuencia de la estación terrena del INRAS. Extraído de [22].

En la Tabla 4.1 se resumen las diferencias mencionadas entre la estación terrena del INRAS y la estación terrena diseñada, las cuales son explicadas más a detalle a continuación.

<b>Estación terrena INRAS</b>	<b>Estación terrena diseñada</b>
Comunicaciones en bandas VHF y UHF realizadas usando un solo par transceptor – TNC.	Comunicaciones en bandas VHF y UHF realizadas usando dos pares transceptor – TNC.
Análisis espectral durante las comunicaciones usando un par transceptor – receptor.	Análisis espectral posible reemplazando un par transceptor – TNC por el par transceptor – receptor.
Conexión directa entre transceptor y antena.	Conexión entre transceptor y antena a través de interruptores conmutados.
Uso de transceptor únicamente en modo recepción, de existir la necesidad de conectar un LNA.	Uso de transceptor con LNA en ambos modos posible gracias a la conmutación entre líneas.

Tabla 4.1: Comparación entre estación terrena INRAS y la estación diseñada.

En la estación, las comunicaciones se realizan a partir de un solo par transceptor-TNC en las bandas VHF y UHF. El par transceptor – receptor (explicado en el capítulo anterior, sección 3.2.2) se utiliza para realizar un análisis espectral durante las comunicaciones. La conexión entre transceptor y antena es directa y no hay necesidad de conmutación entre líneas. La desventaja es que cuando se desea utilizar un LNA para alguna de las líneas de recepción, se debe utilizar el transceptor únicamente en modo recepción.

Por otro lado, en el nuevo diseño se propone el uso de dos pares transceptor-TNC, cuyas conexiones pueden configurarse de tal manera que pueden trabajar cada uno en una banda de frecuencia distinta. Además, es posible mantener conectado los LNA a las líneas de comunicación ya que la conmutación entre líneas que ocurre en la Sección de Radiofrecuencia permite mantenerlo desconectado mientras el transceptor esté transmitiendo. Si se desea

prescindir de los LNA, se puede mantener conectado los interruptores únicamente a la línea de conexión directa.

Por último, el diseño actual de la estación terrena del INRAS puede ser implementado en el diseño propuesto configurando los interruptores de la Sección de Procesamiento y el programa usado en el módulo ‘Selector y Control PTT’ de tal manera que uno de los pares transceptor-TNC se conecte de manera directa a las antenas de las bandas VHF y UHF y los LNA queden desconectados de la línea de transmisión y recepción. Esto es una prueba de que el diseño propuesto es adaptable a distintas configuraciones.



## Observaciones

- El trabajo realizado en este documento es un diseño de sistema, por lo que el enfoque principal ha sido el diseño de un diagrama de bloques de la estación propuesta y no se enfoca en el diseño de circuitos electrónicos. A pesar de ello, se ha realizado diseños de los módulos ‘Selector y Control PTT’ y ‘Secuenciador’, además del circuito interruptor RF, para entender el funcionamiento de estos bloques y, por ende, de la estación.
- La simulación de los circuitos diseñados y, en general, de gran parte de los componentes del diseño propuesto no es realizable en el programa Proteus debido a la inexistencia de un modelo de simulación de varios de los componentes o del costo computacional que requiere. Debido a eso, se optó por una simulación representativa para el cambio de estados de los componentes de una línea y no, por ejemplo, por la simulación de los interruptores RF.
- La implementación del diseño propuesto no es posible en su totalidad debido a la falta de parte de los componentes hasta el momento de finalizado este trabajo (por ejemplo, la falta de una estructura para la antena parabólica de 2 m no permite la implementación completa de la línea de comunicación en banda S). Sin embargo, si se desea probar este diseño en un futuro cercano, la implementación en bandas de frecuencia VHF y UHF se puede realizar por partes con los componentes presentes en el INRAS – PUCP y con la adquisición de los PCB de los diseños circuitales propuestos.

# Conclusiones

- Se diseñó una estación terrena modular para el monitoreo de misiones satelitales universitarias. La estación está pensada para el monitoreo no solo de futuros satélites desarrollados en el INRAS, sino también el de satélites de otras misiones, en caso se realicen trabajos colaborativos con otras instituciones educativas en el Perú o alrededor del mundo.
- Se definieron los módulos que componen la estación terrena tomando en cuenta los requerimientos técnicos principales de una estación terrena estándar. Estos requerimientos toman en cuenta tres puntos importantes: las regulaciones de las bandas de frecuencia (especialmente las de radioaficionados), el uso de los protocolos de comunicación exigidos (específicamente el uso del protocolo AX.25) y la existencia de procesos estandarizados de una estación terrena.
- Se diseñó las secciones de radiofrecuencia y de procesamiento de señales, además de la distribución de los componentes seleccionados para cada módulo. Se realizó adicionalmente diseños esquemáticos para los dispositivos ‘Selector y Control PTT’ y ‘Secuenciador’, además de los interruptores RF. Estos diseños se realizaron teniendo en cuenta el funcionamiento de una estación terrena de radioaficionado, en la cual el TNC controla el cambio entre transmisión y recepción de un transceptor a través de una señal PTT (Push-To-Talk). Los diseños están pensados para su implementación futura o para una comparación con algún diseño nuevo realizado en un trabajo a futuro.
- Se diseñó la sección de datos y control y se realizó la distribución de los componentes seleccionados. Estos componentes permiten tanto el control de los equipos ubicados en otras secciones como los transceptores y los rotores de antenas, como el envío y la recepción de datos entre el satélite y la estación terrena.

- Se realizó una simulación representativa del funcionamiento de la secuenciación realizada por los módulos ‘Selector y Control PTT’ y ‘Secuenciador’. Gracias a esta simulación, se determinó que el concepto del funcionamiento de estos módulos en conjunto genera una secuenciación de cambios de estado, tanto de los interruptores RF como del transceptor correspondientes a una línea de comunicación, que se asemeja al diagrama de tiempos de la secuenciación deseada.



## Bibliografía

- [1] M. Swartwout, “Reliving 24 years in the next 12 minutes: A statistical and personal history of university-class satellites.” [Online]. Available: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2018/all2018/465>
- [2] J. Heraud P., H. Pratt, and S. Mujica, “FROM THE FIRST TWO PERUVIAN SATELLITES TO RESEARCH IN SPACE.”
- [3] T. Villela, C. A. Costa, A. M. Brandão, F. T. Bueno, and R. Leonardi, “Towards the thousandth CubeSat: A statistical overview,” pp. 1–13, publisher: Hindawi Limited. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2019/5063145>
- [4] International Amateur Radio Union (IARU), “Plan de Bandas de IARU Región 2,” <https://www.iaru-r2.org/en-el-aire/planes-de-bandas/>, Sep. 2020.
- [5] S. N. M. Rahim, M. H. Azami, and Z. S. Hamidi, “UiTM amateur satellite ground station: Installation and performance,” vol. 15, pp. 66–74. [Online]. Available: <https://jeesr.uitm.edu.my/v1/IEESR/Vol.15/article11.pdf>
- [6] B. Sheela Rani, C. D. Suryakala, T. A. Shanmuga sundaram, N. Hari Prasad, S. Siva Sundara Pandian, G. Premi, A. Aranganathan, T. Kumar, S. Gaurav, and A. Mitra, “Design techniques of ground station for pollution monitoring nanosatellite,” in *Recent Advances in Space Technology Services and Climate Change 2010 (RSTS CC-2010)*, pp. 321–325. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/RSTSCC.2010.5712820>
- [7] I. Vertat, R. Linhart, M. Pokorny, J. Masopust, P. Fiala, and J. Mraz, “Small satellite ground station in pilsen — experiences with VZLUSAT-1 commanding and future modifications toward open reference ground station solution,” in *2018 28th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/RADIOELEK.2018.8376393>

- [8] M. Fischer and A. L. Scholtz, "Design of a multi-mission satellite ground station for education and research," in *2010 Second International Conference on Advances in Satellite and Space Communications*, pp. 58–63. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SPACOMM.2010.13>
- [9] Y. A. Ahmad, N. J. Nazim, and S. S. Yuhaniz, "Design of a terminal node controller hardware for CubeSat tracking applications," vol. 152, p. 012031, publisher: IOP Publishing. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088%2F1757-899x%2F152%2F1%2F012031>
- [10] N. Gupta, U. Garg, S. Agarwal, and M. Vyas, "Onboard and ground station telemetry architecture design for a LEO nanosatellite," in *2020 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1–18, ISSN: 1095-323X. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172474>
- [11] A. Done, A.-M. Căilean, C.-E. Leşanu, M. Dimian, and A. Graur, "Design and implementation of a satellite communication ground station," in *2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ISSCS.2017.8034925>
- [12] A. G. Cappiello, D. C. Popescu, J. S. Harris, and O. Popescu, "Radio link design for CubeSat-to-ground station communications using an experimental license," in *2019 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, pp. 1–4. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1109/ISSCS.2019.8801767>
- [13] "Database | nanosats.eu | Erik Kulu," <https://airtable.com/shrafcwXODMMKeRgU/tbldJoOBP5wINOJQY>.
- [14] V. Dascal, P. Dolea, T. Palade, and O. Cristea, "Aspects of a low-cost ground station development for GENSO network," vol. 52, no. 4, p. 6.

- [15] R. Lowe, D. Kent, P. Coutinho, and K. Halsall, “Ground segment,” in *The International Handbook of Space Technology*, ser. Springer Praxis Books, M. Macdonald and V. Badescu, Eds. Springer, pp. 575–598. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-41101-4\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41101-4_20)
- [16] Amateur and amateur-satellite services. [Online]. Available: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-52-2014>
- [17] Amateur satellites short info paper. [Online]. Available: [https://www.iaru.org/wp-content/uploads/2019/12/short\\_info\\_paper.pdf](https://www.iaru.org/wp-content/uploads/2019/12/short_info_paper.pdf)
- [18] Plan nacional de atribución de frecuencias (PNAF) - servicios de telecomunicaciones - DGAT – MTC. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/392979-plan-nacional-de-atribucion-de-frecuencias-pnaf-servicios-de-telecomunicaciones-dgat-mtc>
- [19] W. A. Beech, D. E. Nielsen, and J. Taylor, “AX.25 link access protocol for amateur packet radio version 2.2.” [Online]. Available: <https://www.tapr.org/pdf/AX25.2.2.pdf>
- [20] J. E. Espíndola Díaz and A. A. Rodríguez Hernández, “Methodology to implement a satellite ground university station,” in *2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, pp. 261–267. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/Chilecon.2015.7400386>
- [21] M. M. Tseng and C. Wang, “Modular Design,” in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, L. Laperrière and G. Reinhart, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014, pp. 895–897. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7\\_6460](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_6460)
- [22] “Especificaciones del Satélite.” [Online]. Available: <https://inras.pucp.edu.pe/proyectos/pucp-sat-1/especificaciones-del-satelite/>

## Códigos para simulación

### A.1 Programa del Arduino Nano SELECTOR para simulación

```
void setup() {  
    Serial.begin(115200);  
    pinMode(4,OUTPUT);  
    pinMode(6,INPUT);  
}  
void loop() {  
    if (digitalRead(6) == HIGH){ // Cambio a transmisión  
        Serial.print('1');  
        while (!Serial.available());  
        if (Serial.read() == 'K')  
            digitalWrite(4,HIGH);  
    }  
    else if (digitalRead(6) == LOW){ // Cambio a recepción  
        digitalWrite(4,LOW);  
        delay(1);  
        Serial.print('0');  
        while (!Serial.available());  
        Serial.read();  
    }  
}
```

## A.2 Programa del Arduino Nano SECUENCIADOR para simulación

```
char state;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(2,OUTPUT);
  pinMode(3,OUTPUT);
  digitalWrite(2,HIGH);
  digitalWrite(3,LOW);
}

void loop() {
  state = Serial.read();
  if (state == '1'){
    digitalWrite(2,LOW);
    delay(1);
    digitalWrite(3,HIGH);
    delay(1);
    Serial.print('K');
  }
  if (state == '0'){
    digitalWrite(3,LOW);
    delay(1);
    digitalWrite(2,HIGH);
    delay(1);
    Serial.print('K');
```

}  
}

