



**Universidad  
Rey Juan Carlos**

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA  
TELECOMUNICACIÓN**

Curso Académico 2021/2022

Trabajo Fin de Grado

**Diseño e implementación de un sistema de recepción y  
visualización de imágenes de satélites meteorológicos  
en formato APT**

Autora : Rocío Navarro Villarino

Tutora : Ana Arboleya Arboleya

Cotutor: Eduardo Morgado Reyes



# Agradecimientos

Quiero agradecer el apoyo recibido a lo largo de mi periodo académico a todas las personas que me han ayudado a conseguirlo.

En primer lugar, me gustaría agradecérselo a mis padres por su apoyo incondicional en todo momento. Ambos han estado presentes en este recorrido y me han ofrecido su ayuda y apoyo en todo momento. Gracias por ayudarme a crecer y a conseguir mis objetivos.

Quiero agradecer el apoyo recibido a mis amigos, quienes han estado a mi lado en todo momento y han conseguido distraerme de mis estudios, en ciertos momentos, para descansar y seguir con más energía e ilusión. Sin ánimo de dejar a nadie excluido, agradecer especialmente a Pulido, Iara y Xiaomin.

En el ámbito académico, me gustaría agradecerles a mis tutores Ana Arboleya y Eduardo Morgado, por su esfuerzo y dedicación en este trabajo y ofrecerme la oportunidad de poder realizar este proyecto, que me ha servido para despertar mi interés y ampliar mis conocimientos en el segmento terreno de las comunicaciones vía satélite.

Por último, agradecer en gran medida a Carlos, quien ha sido un pilar fundamental todos estos años y me ha ofrecido todo su apoyo y cariño, incluso en mis peores días.

*Per aspera ad astra*



# **Resumen**

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado (TFG) es la implementación de una estación receptora para la recepción y decodificación de las imágenes Automatic Picture Transmission (APT) transmitidas por los satélites de la constelación National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). En la actualidad, los satélites artificiales que orbitan la Tierra se han convertido en una herramienta fundamental que proporcionan mediciones y parámetros necesarios para los estudios y análisis científicos. Estos datos caracterizan las variaciones que se producen en la atmósfera, los cambios en los océanos y las masas de vegetación de la Tierra.

El presente trabajo ofrece el diseño y la implementación de los dispositivos y sistemas que componen las estaciones receptoras, diseñadas para recibir y procesar la información transmitida por los satélites meteorológicos, con el fin de obtener las imágenes que caracterizan la Tierra. Inicialmente, se realiza un estudio de los sistemas involucrados en la recepción mediante la simulación de sus características, con el fin de obtener los parámetros necesarios para el diseño y construcción de una antena receptora. Por otro lado, existen diversas aplicaciones para el procesado de las imágenes meteorológicas, con diferentes costes según las herramientas utilizadas. Por ello, en este proyecto se presenta una aplicación propia, programada en Matlab, con el software necesario para la decodificación, procesado y visualización de las imágenes meteorológicas.



# Acrónimos

**AM** Modulación en Amplitud.

**AMSU** Advanced Microwave Sounding Unit.

**APT** Automatic Picture Transmission.

**AVHRR** Advanced Very High Resolution Radiometer.

**CMA** China Meteorological Administration.

**DC** Double Cross.

**EUMETSAT** Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos.

**FM** Modulación en Frecuencia.

**FPB** Filtro Paso Bajo.

**GUI** Graphical User Interface.

**HIRS** High Resolution Infrared Radiation Sounder.

**HRPT** High-resolution picture transmission.

**ISS** International Space Station.

**JPSS-1** Joint Polar Satellite System.

**LEO** Low Earth Orbit.

**LHCP** Left Hand Circular Polarized.

**MIRP** Manipulated Information Rate Processor.

**MSB** Most Significant Bit.

**NASA** National Aeronautics and Space Administration.

**NOAA** National Oceanic and Atmospheric Administration.

**PIRE** Potencia isotrópica radiada equivalente.

**POES** Polar-Orbiting Environmental Satellites.

**QFH** Antena Cuadrifilar Helicoidal.

**RHCP** Right Handed Circular Polarized.

**RosHydroMet** Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.

**SDR** Software Defined Radio.

**TFG** Trabajo Fin de Grado.

**TIROS** Television Infrared Observation Satellite.

**TLE** Two-Line Element.

**UHF** Ultra High Frequency.

**URJC** Universidad Rey Juan Carlos.

**USB** Universal Serial Bus.

**VCO** Voltage Controlled Oscillator.

**VHF** Very High Frequency.

**VIIRS** Visible Infrared Imaging Radiometer Suite.



# Índice general

<b>Índice de figuras</b>	<b>XV</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XVI</b>
<b>Índice de código</b>	<b>XVII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación y Objetivos . . . . .	2
1.2. Cronograma . . . . .	3
1.3. Estructura del trabajo . . . . .	4
<b>2. Satélites meteorológicos y su importancia en los estudios medioambientales</b>	<b>7</b>
2.1. Sistemas de seguimiento y satélites de órbita polar . . . . .	7
2.2. Satélites NOAA . . . . .	9
2.2.1. Sensor AVHRR . . . . .	10
2.2.2. Formato APT . . . . .	14
2.2.3. Modulación de la señal . . . . .	19
<b>3. Sistema de recepción</b>	<b>22</b>
3.1. Antenas para la recepción de satélites polares en formato APT . . . . .	23
3.1.1. Tamaño y longitud de onda de la antena receptora . . . . .	23
3.1.2. Polarización . . . . .	24
3.1.3. Directividad y diagrama de radiación . . . . .	26
3.1.4. Antenas directivas y sistemas de posicionamiento/seguimiento . . . . .	27
3.1.5. Antenas omnidireccionales . . . . .	34

## ÍNDICE GENERAL

---

3.2. Equipos de recepción . . . . .	37
3.2.1. Receptores convencionales . . . . .	37
3.2.2. Receptores SDR . . . . .	39
3.3. Software de decodificación y procesado . . . . .	40
3.3.1. WXtoImg . . . . .	40
3.3.2. NOAA APT decoder . . . . .	41
3.3.3. Otros softwares comerciales . . . . .	43
<b>4. Diseño e implementación del sistema de recepción y visualización de imágenes en formato APT</b>	<b>44</b>
4.1. Esquema general . . . . .	44
4.2. Balance de enlace . . . . .	45
4.3. Elección y construcción de la antena . . . . .	48
4.3.1. Parametrización de la antena QFH . . . . .	48
4.3.2. Construcción de la antena QFH . . . . .	52
4.3.3. Parámetros de la antena QFH . . . . .	58
4.4. Equipo de recepción y demodulación . . . . .	61
4.5. Software de recepción y procesado: NOAApp . . . . .	62
4.5.1. Remuestreo de la señal . . . . .	63
4.5.2. Demodulación de la señal . . . . .	63
4.5.3. Reorganización de las muestras . . . . .	65
4.5.4. Sincronización de la señal . . . . .	66
4.5.5. Reducción del ruido de la señal APT . . . . .	71
4.5.6. Falso color . . . . .	76
4.5.7. Aumentar el contraste de la imagen . . . . .	78
4.5.8. Herramientas de recorte . . . . .	80
<b>5. Resultados de las pruebas realizadas</b>	<b>83</b>
5.1. Pasada del satélite NOAA-18 . . . . .	83
5.2. Recepción y procesado de la señal APT con la estación receptora construida . .	84

## ÍNDICE GENERAL

---

<b>6. Conclusiones</b>	<b>90</b>
6.1. Líneas Futuras . . . . .	91
<b>Bibliografía</b>	<b>95</b>
<b>Apéndices</b>	<b>97</b>
<b>A. Manual de usuario</b>	<b>98</b>
A.1. Ventana de Inicio . . . . .	98
A.2. Ventana de Procesado . . . . .	100
A.3. Ventana de Visualización . . . . .	103
<b>B. Presupuesto de la implementación</b>	<b>105</b>
B.1. Materiales y elementos para la estructura de la antena . . . . .	105
B.2. Herramientas para la implementación de la estructura de la antena . . . . .	106
B.3. Implementación en 3 dimensiones de la estructura . . . . .	106
B.4. Software para el diseño de la antena y el procesado de la señal APT . . . . .	106
B.5. Dispositivos para la recepción y el procesado de la señal . . . . .	107
B.6. Recursos humanos . . . . .	107
B.7. Resumen de costes . . . . .	108
<b>C. Hoja de características de los componentes utilizados</b>	<b>109</b>

# Índice de figuras

2.1. Ejemplo de una órbita polar de los satélites meteorológicos [2]. . . . .	8
2.2. Recorrido orbital del satélite NOAA-18 [7]. . . . .	11
2.3. Representación de la resolución espacial del sensor AVHRR [9]. . . . .	12
2.4. Esquema de procesado del módulo MIRP. . . . .	15
2.5. Estructura del formato de la señal APT. . . . .	16
2.6. Estructura de las tramas de sincronización de los canales A y B [9]. . . . .	17
2.7. Trama de la señal APT. . . . .	17
2.8. Ejemplo del formato de la señal APT sobre una imagen real. . . . .	18
2.9. Ejemplo de la modulación en amplitud (AM) y en frecuencia (FM) [16]. . . . .	21
3.1. Esquema de recepción de la señal APT. . . . .	23
3.2. Elipse de polarización. . . . .	24
3.3. Tipos de polarización. . . . .	25
3.4. Ejemplos de diagrama de radiación de una antena [20]. . . . .	27
3.5. Elementos principales de la antena Yagi-Uda [23]. . . . .	28
3.6. Simulación de una antena Yagi-Uda. . . . .	29
3.7. Ejemplo de diagrama de radiación de una antena Yagi-Uda. . . . .	29
3.8. Simulación de una antena Cross Yagi-Uda. . . . .	30
3.9. Ejemplo de diagrama de radiación de una antena Cross Yagi-Uda. . . . .	30
3.10. Ejemplo de la polarización de la antena Yagi-Uda y Cross Yagi-Uda. . . . .	31
3.11. Interfaz de la página web Heavens Above [24]. . . . .	32
3.12. Representación del ángulo de elevación y el acimut [26]. . . . .	33
3.13. Estructura de la antena cuadrifilar helicoidal. . . . .	35
3.14. Diagrama de radiación de la antena QFH. . . . .	36

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

3.15. Estructura de la antena Double Cross [29]. . . . .	37
3.16. Receptor convencional: Walkie talkie baofeng UV3R+ [30]. . . . .	38
3.17. Ejemplo del diagrama de bloques del receptor convencional FM. . . . .	38
3.18. Receptor RTL-SDR: Nooelec NESDR Mini 2+ 0.5PPM TCXO [34]. . . . .	39
3.19. Ejemplo de imagen decodificada por la aplicación <i>WXtoImg</i> . . . . .	40
3.20. Ejemplos de la imagen editada con las herramientas de <i>WXtoImg</i> . . . . .	41
3.21. Ejemplo de imagen decodificada por la aplicación <i>NOAA APT decoder</i> . . . . .	42
3.22. Ejemplos de la imagen en falso color de <i>NOAA APT decoder</i> . . . . .	42
 4.1. Antena QFH con los parámetros optimizados. . . . .	50
4.2. Ganancia de la antena QFH [dBi]. . . . .	51
4.3. Relación axial normalizada de la antena QFH [dB]. . . . .	52
4.4. Coeficiente de reflexión de la antena QFH. . . . .	52
4.5. Tubos secundarios de la estructura de la antena QFH. . . . .	54
4.6. Pieza central de la estructura de la antena QFH. . . . .	54
4.7. Posiciones de los agujeros para la introducción de los tubos secundarios y el cable de alimentación. . . . .	56
4.8. Estructura final de la antena QFH. . . . .	57
4.9. Implementación de las conexiones de las espiras y la alimentación. . . . .	57
4.10. Estado final de la antena QFH. . . . .	58
4.11. Pruebas de radiación en el laboratorio. . . . .	60
4.12. Comparación de los parámetros de radiación de la antena QFH simulada en <i>Feko</i> y la antena QFH real construida en el proyecto. . . . .	60
4.13. Primera medición del coeficiente de reflexión de la antena QFH. . . . .	61
4.14. Segunda medición del coeficiente de reflexión de la antena QFH. . . . .	61
4.15. Ejemplo de un fragmento de una señal de audio recibida de los satélites NOAA. .	64
4.16. Ejemplo de la envolvente de la señal. . . . .	65
4.17. Ejemplo de la sincronización por línea de la imagen APT. . . . .	67
4.18. Ejemplos de sincronización por trama de la imagen APT. . . . .	70
4.19. Ejemplo de sincronización uniforme de la imagen APT. . . . .	71
4.20. Reducción del ruido de la imagen APT con diferentes filtros. . . . .	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

4.21. Imagen APT en falso color. . . . .	77
4.22. Imagen APT en falso color: matrices RGB a partir del canal A y el canal B. . . . .	78
4.23. Ejemplo de una imagen APT y su histograma. . . . .	79
4.24. Ejemplo del aumento del contraste con el método de expansión de una imagen APT. . . . .	80
4.25. Ejemplo del aumento del contraste con el método de ecualización de una imagen APT. . . . .	81
4.26. Imagen APT sin tramas de información. . . . .	82
5.1. Pasada del satélite NOAA-18, el 3 de febrero de 2022. . . . .	84
5.2. Imágenes meteorológicas obtenidas en la prueba del 3 de febrero de 2022. . . . .	86
5.3. Imagen meteorológica con falso color. . . . .	87
5.4. Imagen meteorológica con contraste. . . . .	87
5.5. Imagen meteorológica procesada con NOAA APT. . . . .	88
5.6. Imagen meteorológica a falso color procesada con NOAA APT. . . . .	88
5.7. Imagen meteorológica con las fronteras de los países procesada con NOAA APT. . . . .	89
A.1. Interfaz de la ventana Inicio. . . . .	99
A.2. Selección del fichero wav. . . . .	99
A.3. Mensaje de información de procesado del archivo. . . . .	100
A.4. Mensaje de información de error en el archivo. . . . .	100
A.5. Interfaz de la ventana Procesado: False color. . . . .	101
A.6. Mensajes de información en la ventana de Procesado. . . . .	101
A.7. Opciones del falso color. . . . .	102
A.8. Interfaz de la ventana Procesado: Crop image. . . . .	103
A.9. Interfaz de la ventana Visualización. . . . .	104

# Índice de tablas

1.2. Cronograma de las tareas realizadas en este proyecto. . . . .	5
2.1. Satélites modernos de la serie National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y sus características principales [4]. . . . .	10
2.2. Bandas espectrales del radiómetro AVHRR-3 y sus características. . . . .	13
2.3. Información de los bloques de telemetría. . . . .	16
4.1. Pérdidas de propagación del enlace de comunicaciones según la distancia entre las antenas. . . . .	47
4.2. Ganancia necesaria de la antena receptora según el valor de sensibilidad del receptor. . . . .	47
4.3. Parámetros y valores de entrada a la herramienta <i>online</i> . . . . .	49
4.4. Parámetros y valores de salida de la herramienta <i>online</i> . . . . .	49
4.5. Valores optimizados de los parámetros que caracterizan la antena. . . . .	50
4.6. Medidas de los tubos secundarios en milímetros. . . . .	54
4.7. Medidas finales de los tubos secundarios en milímetros. . . . .	55
B.1. Costes de los materiales para la implementación de la antena QFH. . . . .	105
B.2. Costes de las herramientas utilizadas en la construcción de la antena QFH. . . .	106
B.3. Costes de la implementación de la estructura de la antena QFH en 3 dimensiones.	106
B.4. Costes del software utilizado en la recepción y decodificación de la señal APT. .	106
B.5. Costes de los dispositivos utilizados en la recepción de la señal APT. . . . .	107
B.6. Costes de la mano de obra para la realización de la estación receptora. . . . .	107
B.7. Resumen de costes. . . . .	108

# **Índice de códigos**

4.1. Tramas de sincronización canal A y canal B. . . . .	66
4.2. Patrón de localización de tramas. . . . .	68

# **Capítulo 1**

## **Introducción**

En el presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se presenta la elaboración de una estación receptora de señales vía satélite, cuyo objetivo es la recepción y procesado de las imágenes transmitidas por la constelación de satélites National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). La relevancia de estas imágenes se debe a la información meteorológica que se puede extraer de ellas para el estudio y la comprensión de los fenómenos meteorológicos que afectan a los océanos y a la atmósfera de la Tierra.

En primer lugar, la estación receptora es el término utilizado para referirnos a un conjunto de sistemas en serie para la recepción y procesado de la señal. Este sistema se compone de un conjunto de elementos para su correcto funcionamiento, los cuales se han estudiado y desarrollado a lo largo de este proyecto. El componente inicial de este sistema es la antena receptora, encargada de captar la señal emitida por los satélites NOAA. En la literatura científica existen una gran diversidad de modelos de antenas que se adaptan a los enlaces de comunicación para el que están diseñadas. Por tanto, es necesario realizar un estudio detallado de las especificaciones necesarias en el enlace de comunicaciones entre el transmisor de este proyecto, el satélite, y la antena. Una vez conocidas las necesidades del enlace, se plantea el análisis de diversos tipos de antenas que pueden cubrir dichas características, con el objetivo de elegir la mejor opción para este trabajo. Finalmente, después de escoger y realizar un diseño inicial de la antena, se han de optimizar los parámetros que la caracterizan para proceder a su elaboración física.

Por otro lado, el demodulador es uno de los equipos más importantes en la recepción de la señal en formato Automatic Picture Transmission (APT) transmitida por los satélites NOAA. Mediante este equipo se procesa la señal APT recibida y se obtiene la señal de audio preparada

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

para el inicio de la decodificación.

Finalmente, el último elemento que compone el sistema de recepción de este proyecto es el software de decodificación y procesado de la señal. La finalidad de este componente es la obtención de la imagen meteorológica a partir de la señal recibida y la representación de la información necesaria para el estudio de la atmósfera, la superficie y los océanos de la Tierra.

El último apartado de este proyecto se basa en el desarrollo de *NOAApp*, una aplicación de escritorio que implementa el software desarrollado previamente para la decodificación y procesado de la señal de audio, ofreciendo finalmente la imagen meteorológica.

### 1.1. Motivación y Objetivos

El objetivo principal de este proyecto comprende el **estudio y desarrollo de un sistema de recepción de imágenes en formato APT, transmitidas por los satélites polares que pertenecen a la constelación satelital NOAA**. En la actualidad los satélites meteorológicos son de gran relevancia debido a la información de carácter científico que se puede extraer de sus señales. Existen diferentes organizaciones encargadas de realizar estudios medioambientales a partir de las imágenes meteorológicas. La Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos tiene diversos objetivos tales como analizar los cambios que se producen en la atmósfera terrestre y en la temperatura de los océanos ocasionados por el cambio climático y, por otro lado, la predicción de huracanes o tormentas en la Tierra. Estos estudios son realizados a partir de la información extraída de las imágenes meteorológicas captadas por los satélites polares NOAA.

Por consiguiente, en el proceso de alcanzar el objetivo principal de este trabajo se desarrollan objetivos específicos, que a su vez se dividen en las tareas citadas a continuación:

#### 1. Diseño y construcción de una antena receptora

- Realizar un estudio de los diversos tipos de antenas habituales en la recepción de una señal transmitida por satélites en órbita polar.
- Diseñar los parámetros característicos de la antena receptora con el objetivo de obtener los valores que permitan cumplir los requisitos del enlace de comunicaciones entre el transmisor y el receptor.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

- Construir y caracterizar en base a los requisitos óptimos previamente obtenidos, la antena receptora de la señal meteorológica.

### 2. Recepción de la señal

- Realizar diferentes pruebas de recepción de la señal transmitida por el satélite mediante la antena construida y los receptores Software Defined Radio (SDR) y Ultra High Frequency (UHF).

### 3. Desarrollo del software

- Estudiar los procesos de decodificación necesarios para una correcta decodificación de la señal de audio en formato APT recibida inicialmente. Estos métodos componen el software esencial para la obtención de la información que forma la imagen meteorológica.
- Desarrollar el código necesario para realizar la decodificación mediante los procesos citados en la tarea anterior implementando además posibles mejoras en la representación visual de la imagen recibida.
- Diseñar una aplicación de escritorio cuyo propósito es ofrecer al usuario la imagen correspondiente a la señal de audio introducida al inicio del sistema y permitirle experimentar diversos procesados de la imagen. Además, dicha aplicación se puede utilizar con fines docentes para una mejora en el aprendizaje de los procesados de la imagen.

## 1.2. Cronograma

Este trabajo se ha desarrollado en base a la realización de diferentes tareas. En la Tabla 1.2 se representa la cronología de las actividades que componen el proyecto. Por otro lado, el tiempo dedicado a este proyecto se ha compaginado simultáneamente con la finalización de los estudios del grado, la realización del TFG de Ingeniería Aeroespacial en Aeronavegación y la realización de las prácticas externas.

Inicialmente y con el objetivo comprender el tema principal del proyecto, se ha realizado un estudio sobre la constelación de los satélites NOAA. Además, es necesario analizar el formato

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

de las imágenes APT transmitidas por estos satélites.

Una vez realizado el estudio anterior, la primera parte en la implementación del proyecto se basa en el diseño y creación de una estación receptora. Por ello, se han estudiado qué tipos de antenas son las más habituales en la recepción de la señal APT, con el objetivo de simular y construir la antena que mejor se adapte a las características necesarias. Además, es necesario iniciar este proceso con la simulación de la antena elegida, para implementar las características obtenidas en la simulación.

Por otro lado, la segunda parte de este proyecto se ha basado en el desarrollo del código de la aplicación NOAAApp. Este proceso se centra en la implementación de los métodos de decodificación y sincronización de la imagen APT. Finalmente, se ha elaborado una interfaz útil y sencilla para que el usuario haga uso de las herramientas disponibles para el tratamiento de la imagen.

Por último, se ha elaborado la memoria de este trabajo con el fin de exponer la documentación y los resultados obtenidos.

### 1.3. Estructura del trabajo

A continuación, se presenta la estructura del este trabajo con el fin de aportar una breve descripción de los capítulos que lo componen.

En el Capítulo 2 se analizan los satélites de órbita polar. Este estudio se centra en la constelación satelital NOAA y, además, se detallan las características de la órbita del NOAA-18, satélite central en este proyecto. Por otro lado, se aborda el estudio sobre el sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) a bordo de dichos satélites que es capaz de captar las imágenes de la superficie terrestre. Estas imágenes son la base de estudios científicos cuyo objetivo es el análisis de la atmósfera terrestre y de los océanos. Finalmente, este capítulo presenta los detalles del formato de imágenes APT y plantea un análisis en profundidad de las líneas y bloques que componen la imagen, con el objetivo de conocer la distribución de los datos en la misma.

El tercer capítulo del trabajo analiza con mayor detalle el sistema de recepción de la estación construida. En primer lugar, se presentan las características necesarias de las antenas para recibir la señal APT. A partir de estos parámetros, se muestran diferentes tipos de antenas con el objetivo de estudiar las alternativas y escoger el dispositivo que mejor se adapte a las necesidades.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

Actividades	Meses										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Estudio de los satélites meteorológicos NOAA											
2. Estudio y análisis de las imágenes APT											
3. Estudio de las antenas											
3.1. Análisis de los tipos de antenas más habituales											
3.2. Simulación y optimización de la antena QFH											
3.3. Implementación y construcción del primer modelo QFH											
3.4. Implementación y construcción del segundo modelo QFH											
3.5. Pruebas en el laboratorio y en el exterior											
4. Desarrollo del código de la aplicación NOAApp											
4.1. Demodulación de la señal APT											
4.2. Sincronización de la señal APT											
4.3. Desarrollo de las herramientas de diseño de la aplicación APT											
4.4. Desarrollo de la interfaz de la aplicación											
5. Elaboración de la memoria del proyecto											

Tabla 1.2: Cronograma de las tareas realizadas en este proyecto.

Por otro lado, la estación receptora consta de un equipo de recepción que demodula la señal recibida. En este proyecto se han utilizado dos modelos de equipo: convencionales y SDR, que se analizan en dicho capítulo. Por último, se presentan varias aplicaciones que utilizan procesos de decodificación de la señal APT con el objetivo de obtener las imágenes meteorológicas.

En el cuarto capítulo se exponen las características y componentes necesarios para la implementación de la estación receptora. La comunicación vía satélite depende de varios factores tales como el balance de enlace y los equipos que componen el sistema. Por tanto, inicialmente se realiza el estudio del balance de enlace, con el fin de conocer la sensibilidad de los equipos de recepción. A continuación, se describe el equipo de recepción SDR utilizado para recibir la señal APT. Una vez elegida la antena a construir en el proyecto, en base a las características necesarias,

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

se muestran los valores obtenidos en la simulación de la antena y las tareas necesarias para su construcción. Finalmente, se define el software desarrollado para la decodificación y procesado de la imagen meteorológica.

En el Capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos a partir de las diferentes pruebas realizadas con la estación receptora construida. En este capítulo, se pueden ver las imágenes APT recibidas por la antena QFH y decodificadas por el software de decodificación de la aplicación NOAAApp.

Finalmente, en el Capítulo 6 se tratan las conclusiones del presente TFG. Además, se plantea el desarrollo de algunas líneas futuras con el objetivo de perfeccionar la estación y el procesado de las imágenes.

Además, se incluyen tres apéndices al final de la memoria. En primer lugar, se describe el manual de usuario de la aplicación NOAAApp, compuesta por tres pantallas diseñadas para el procesado y visualización de la imagen APT recibida. En segundo lugar, se presenta el presupuesto para el diseño e implementación de la estación receptora de este trabajo. Y en el último apéndice, se incluyen las hojas técnicas de algunos elementos que componen la estación.

## **Capítulo 2**

# **Satélites meteorológicos y su importancia en los estudios medioambientales**

Los satélites meteorológicos son instrumentos artificiales que orbitan alrededor de la Tierra. Estos satélites han sido diseñados con el propósito de obtener información relevante y estudiar diferentes parámetros meteorológicos que caracterizan la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre o el cambio climático en la Tierra. Los satélites NOAA son un determinado tipo de satélites meteorológicos que captan imágenes de alta resolución de la superficie terrestre con el fin de obtener información sobre los parámetros medioambientales del planeta.

Los satélites artificiales describen diferentes tipos de órbitas alrededor de la Tierra según la cobertura necesaria para sus funciones. En este capítulo se realiza un análisis de la órbita que recorren los satélites meteorológicos. Además, se procede a explicar algunos sistemas de captación de imágenes y el formato de datos que es transmitido.

### **2.1. Sistemas de seguimiento y satélites de órbita polar**

Los satélites artificiales describen una trayectoria alrededor de la Tierra que recibe el nombre de órbita. Existen diferentes tipos de órbitas según las funcionalidades de cada satélite, clasificándose en grupos según la altura, la inclinación y la forma.

Los satélites meteorológicos describen una órbita polar dado que la inclinación de la órbita respecto el plano de la eclíptica de la Tierra<sup>1</sup> es un ángulo de 90° y, por tanto, su trayectoria

---

<sup>1</sup>Plano de la eclíptica de la Tierra: plano en el que está contenida la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Este

alrededor de la Tierra pasa aproximadamente por encima de los polos (Figura 2.1).

La altura de la órbita define la distancia que existe entre el satélite artificial y la Tierra. En el caso de los satélites meteorológicos es necesaria su cercanía a la superficie terrestre con el objetivo de obtener imágenes con mayor resolución y, por consiguiente, describen una órbita de baja altura, Low Earth Orbit (LEO), cuya altura respecto la superficie del planeta es entre 200 y 2.000 kilómetros aproximadamente. Producto de su cercanía a la Tierra, la fuerza gravitacional que deben contrarrestar es de gran magnitud. Por ello, la velocidad de los satélites es elevada alcanzando la magnitud de 27.000 km/h. Por otro lado, debido a las velocidades y la altura de la órbita se obtiene un periodo de minutos o pocas horas. Finalmente, es importante destacar la forma quasi-circular con una excentricidad próxima a 0 de este tipo de órbitas [1].

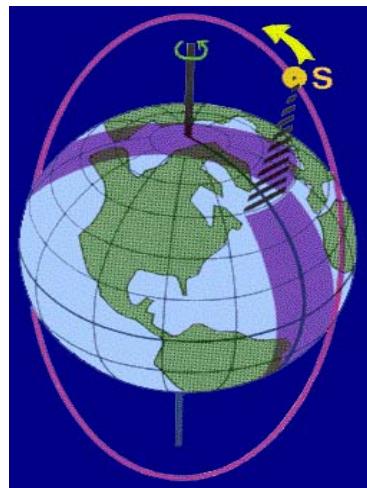


Figura 2.1: Ejemplo de una órbita polar de los satélites meteorológicos [2].

En la Figura 2.1 se observa el recorrido realizado por un satélite, representado como un punto de color amarillo, en una órbita polar. Los satélites meteorológicos requieren visualizar la superficie de la Tierra al completo con el objetivo de captar las imágenes de toda la superficie. Las órbitas que mejor se adaptan a estas características son tipo polar y helio-síncronas, las cuales se caracterizan por su paso en un mismo tiempo solar local por una latitud determinada, lo que produce una iluminación adecuada para recoger imágenes de la superficie terrestre.

---

plano se encuentra inclinado  $23^{\circ}27'$

## 2.2. Satélites NOAA

NOAA es la organización estadounidense responsable de los satélites de la constelación del mismo nombre. Esta constelación de satélites se distribuye alrededor de la Tierra en una órbita polar y helio-síncrona, con la finalidad de recopilar datos e imágenes sobre la atmósfera terrestre y otros parámetros meteorológicos. Los satélites NOAA pertenecen al proyecto Polar-Orbiting Environmental Satellites (POES) desarrollado en 1978 por la organización estadounidense junto a Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT) con el fin de obtener una cobertura global de la superficie terrestre [3].

Desde 1970 hasta la actualidad, NOAA ha desarrollado numerosos satélites con el objetivo de proporcionar los datos necesarios para la monitorización de la atmósfera terrestre y los océanos. Desde el lanzamiento del primer satélite NOAA-1 en 1970, se han incorporado diferentes sensores e instrumentos a los satélites de la constelación, evolucionando y mejorando las características de los datos transmitidos. A lo largo de estos 50 años han dejado de estar operativas algunas series NOAA, sin embargo, muchas otras sirven de apoyo a nuevas generaciones.

En la siguiente Tabla 2.1 se explican las funcionalidades de la evolución de los satélites desarrollados por NOAA en los últimos años. Todos ellos pertenecen a la serie Television Infrared Observation Satellite (TIROS) que hace referencia a los satélites que permiten la observación de la Tierra mediante canales infrarrojos.

Existen otros países que han desarrollado satélites artificiales de tipo meteorológico, como es el caso de la organización europea EUMETSAT con la serie *Metop*, constituida por satélites en órbita polar para la pronosticación climática [5]; RosHydroMet en Rusia con *Meteor*, formada por una serie de satélites cuya función es analizar el estado de las capas de hielo, además del estado de la ionosfera y el campo magnético de la Tierra y CMA (China), cuyos satélites Fengyun-3 son responsables de la monitorización de los desastres naturales a gran escala [6]. De entre la gran cantidad de satélites meteorológicos alrededor de la Tierra, este proyecto se centra en el procesado de la información recibida en formato APT de los satélites de la constelación NOAA, cuyas características fundamentales se describen a continuación más en detalle.

En la Figura 2.2 se muestran tres imágenes de la órbita que traza el satélite NOAA-18 desde perspectivas diferentes. En las Figuras 2.2(a) y 2.2(b) se puede analizar la órbita LEO y polar que recorre el satélite NOAA-18. La cercanía que se observa entre la órbita y la superficie terrestre

## CAPÍTULO 2. SATÉLITES METEOROLÓGICOS Y SU IMPORTANCIA EN LOS ESTUDIOS MEDIOAMBIENTALES

---

Serie	Actividad	Características
NOAA-15	1998-Actualidad	Es el satélite secundario en horario a.m. que complementa las operaciones de NOAA-20.
NOAA-16	2000-2014	Disponía de los instrumentos a bordo Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU), AVHRR y High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS).
NOAA-17	2002-2013	Unidad similar al satélite NOAA-16.
NOAA-18	2005-Actualidad	Es el satélite secundario en horario p.m. de las operaciones de NOAA-20.
NOAA-19	2009-Actualidad	Actualmente dispone de todos sus instrumentos en condiciones óptimas y se dispone a remplazar al NOAA-18.
NOAA-20	2017-Actualidad	Programa de colaboración de NOAA y National Aeronautics and Space Administration (NASA). También recibe el nombre de Joint Polar Satellite System (JPSS-1)

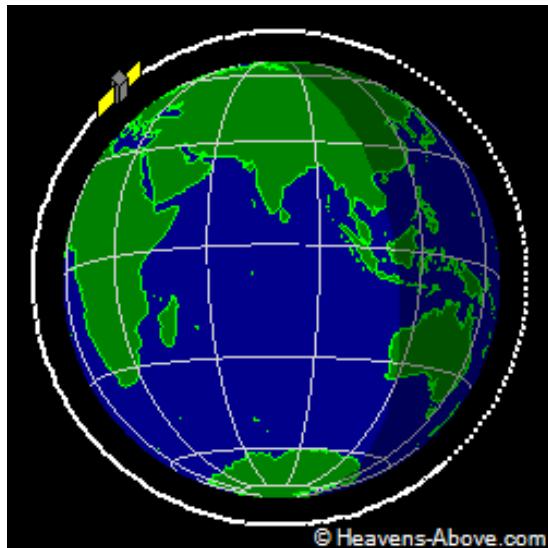
Tabla 2.1: Satélites modernos de la serie NOAA y sus características principales [4].

hace referencia a una órbita baja y, por otro lado, la trayectoria del satélite pasa aproximadamente por los polos terrestre siendo, por tanto, una órbita polar.

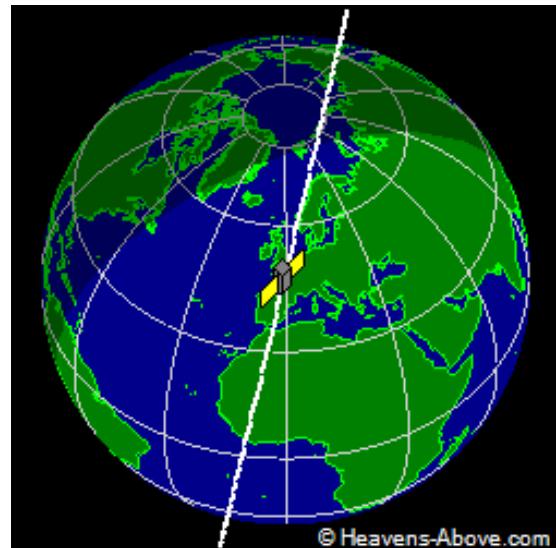
### 2.2.1. Sensor AVHRR

Los sensores a bordo de los satélites meteorológicos NOAA son los equipos encargados de la captación de imágenes, cuyo fin puede ser de uso científico (mapeo de la vegetación o estudio de la formación de las nubes) o de uso militar (posicionamiento de aeronaves o bases terrestres).

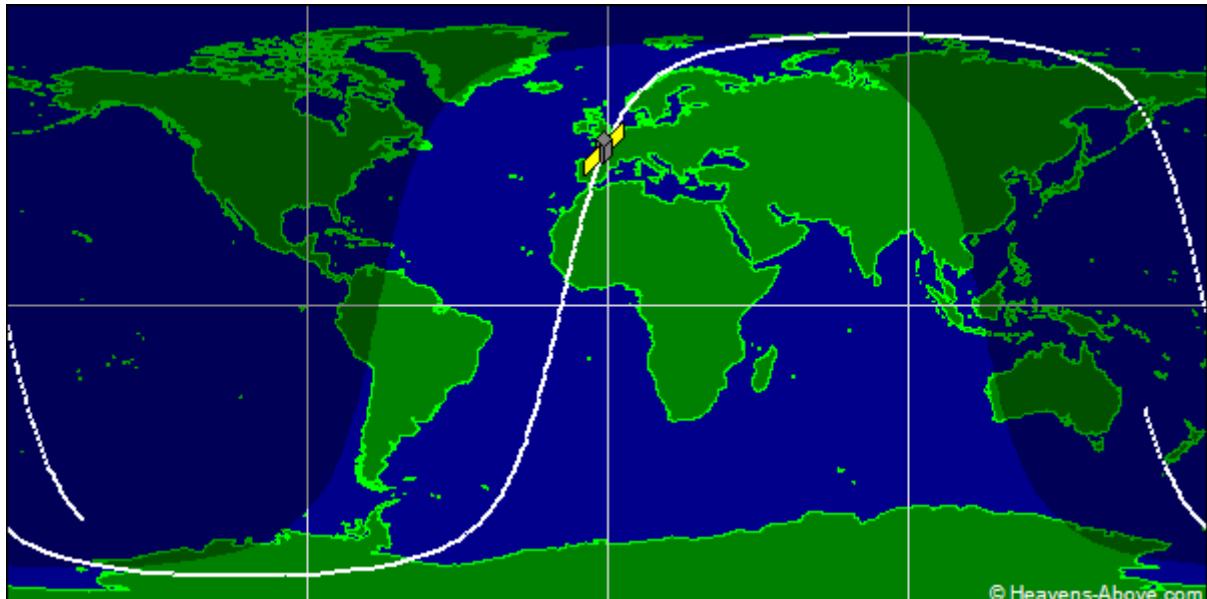
Estos sensores se pueden clasificar en dos grupos: activos, los cuales emiten su propia radiación y reciben el eco de la misma, y los pasivos, que solo reciben la radiación emitida por la Tierra o la atmósfera. El equipo AVHRR pertenece a los sensores pasivos, también llamados radiómetros, debido a que no emite una radiación propia, sino que capta la radiación reflejada por la superficie terrestre [8].



(a) Vista perpendicular al plano orbital.



(b) Vista sobre el satélite.



(c) Trayectoria de superficie (*Ground track*).

Figura 2.2: Recorrido orbital del satélite NOAA-18 [7].

Existen diferentes tipos de sensores pasivos según el método de detección, siendo el más utilizado el detector por barrido. Este método se fundamenta en un escáner compuesto por un espejo móvil que explora la franja perpendicular a la trayectoria del satélite, cubriendo así toda la superficie. En este proyecto es destacable este tipo de sensores debido a que el sensor a bordo de los satélites NOAA es un radiómetro de barrido de banda ancha de alta resolución.

A lo largo del tiempo, el equipo AVHRR se ha ido actualizando y hoy en día existen tres

evoluciones del sensor: el AVHRR-1 se encuentra a bordo de los NOAA-6,-8,-10; la segunda evolución del sensor la llevan equipada los NOAA-7,-9,-11,-12,-13,-14 y la última modificación, AVHRR-3, se encuentra en los NOAA-15,-16,-17,-18,-19. Por otro lado, el satélite NOAA-20 dispone del radiómetro Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), un instrumento más avanzado y con mejor rendimiento que el AVHRR.

Por otro lado, el sensor AVHRR capta la radiación según cuatro dimensiones: espacial, temporal, espectral y radiométrica. Estas dimensiones son importantes para la caracterización de la señal.

La **resolución espacial** es el tamaño del terreno captado en cada píxel de la imagen. En este tipo de escáner la resolución espacial es de hasta 1.1 km/px en el nadir<sup>2</sup> cuando se utiliza el formato High-resolution picture transmission (HRPT) de transmisión de datos. Habitualmente, los datos obtenidos por el sensor AVHRR a bordo de la constelación de satélites NOAA se transmiten en el formato HRPT con el fin de recibir imágenes en alta resolución, sin embargo, simultáneamente se transmiten los datos en el formato APT que dispone de menor resolución (4 km/px) con el objetivo de realizar estaciones meteorológicas más sencillas y de menor coste, que puedan analizar los datos con mayor antelación.

En la Figura 2.3 se puede observar una ilustración representativa del *swath*<sup>3</sup> del satélite como una franja de color gris alrededor de la Tierra. Por otro lado, el nadir es la intersección de la superficie terrestre y la línea de color rojo que desciende desde el satélite a la superficie.

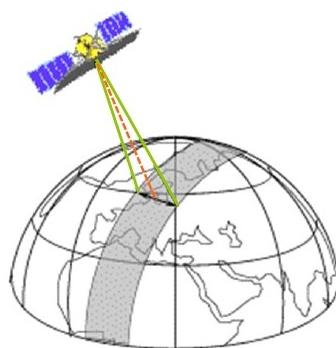


Figura 2.3: Representación de la resolución espacial del sensor AVHRR [9].

El rango temporal entre la toma de imágenes consecutivas recibe el nombre de **resolución temporal**. El tipo de órbita, el ángulo de barrido o la velocidad del satélite caracterizan la

<sup>2</sup>Nadir: es el punto de intersección entre la superficie terrestre y la vertical del satélite

<sup>3</sup>Swath: es el área de la Tierra que el satélite cubre en una órbita

## CAPÍTULO 2. SATÉLITES METEOROLÓGICOS Y SU IMPORTANCIA EN LOS ESTUDIOS MEDIOAMBIENTALES

---

resolución temporal del sensor [10].

La **resolución espectral** se define por el número de bandas y el ancho del espectro electromagnético que es capaz de captar el sensor. Las bandas, también llamadas canales, son las franjas de longitud de onda que capta el sensor. Un mayor número de bandas implica una mejor caracterización de la superficie terrestre. Por otro lado, la resolución espectral no solo depende del número de canales, sino también de la anchura de estos.

El AVHRR-3 tiene seis canales y, por tanto, es capaz de medir la radiación en seis bandas espectrales. En la Tabla 2.2 se pueden observar los canales del sensor AVHRR y en qué situación son utilizados habitualmente [11].

Canales	Longitud de onda [ $\mu m$ ]	Principal uso
1	0.58 - 0.68	Luz visible: nubes y superficie con luz solar
2	0.72 - 1.1	Infrarrojo cercano a luz visible (infrarrojo solar): delimitación entre agua y tierra
3A	1.58 - 1.64	Infrarrojo cercano a luz visible: detección de hielo y nieve
3B	3.55 - 3.93	Infrarrojo medio: nubes y temperatura nocturna del mar
4	10.3 - 11.3	Infrarrojo medio: nubes y temperatura nocturna del mar
5	11.5 - 12.5	Infrarrojo medio: temperatura del océano

Tabla 2.2: Bandas espectrales del radiómetro AVHRR-3 y sus características.

Y, por último, la **resolución radiométrica** hace referencia a la sensibilidad del sensor. Esta resolución define la capacidad del sensor para diferenciar entre pequeñas variaciones de la radiación captada. Se caracteriza por el número de bits necesarios para almacenar un píxel de la imagen meteorológica.

Generalmente, existe una relación entre la resolución espacial y la resolución temporal, por tanto, al reducir el tamaño del terreno capturado por la imagen (aumenta la resolución espacial) el tiempo de captura entre imágenes consecutivas se reduce (disminuye la resolución temporal y también la resolución espectral). Un dato relevante es que al aumentar alguna de las resoluciones se aumenta también la cantidad de datos que se deben transmitir y procesar [12].

## 2.2.2. Formato APT

Uno de los objetivos principales de los satélites NOAA es la captación y transmisión de imágenes meteorológicas de la atmósfera terrestre. Estas imágenes, como se ha analizado en la Sección 2.2.1, son captadas por el sensor AVHRR-3 y transmitidas en el formato APT.

El formato APT es un sistema de transmisión analógico creado en el año 1970 para transmitir señales meteorológicas. La utilización de este formato ha sido de gran utilidad debido a la sencillez y bajo coste de los equipos de recepción, que no afecta en gran medida a la calidad de las imágenes recibidas.

Los satélites NOAA procesan la señal captada por el sensor AVHRR antes de transmitirla y este proceso se realiza mediante el módulo de procesado Manipulated Information Rate Processor (MIRP). En la Figura 2.4 se ilustra el esquema de procesado de la señal llevado a cabo por el módulo MIRP. Inicialmente la señal captada por el sensor está formada por palabras constituidas por 10 bits y, por tanto, el primer paso que debe realizar el módulo es la obtención de los 8 bits más significativos de cada palabra, Most Significant Bit (MSB), procediendo después a la adición de las muestras de telemetría y calibración de los canales de la imagen. Posteriormente se realiza la Modulación en Amplitud (AM) de los datos mediante una señal portadora con frecuencia 2.4 kHz. La señal transmitida en el formato APT es una señal analógica, por consiguiente, es necesario realizar una conversión digital/analógica antes de realizar la Modulación en Frecuencia (FM) de los datos a la frecuencia del satélite NOAA (en la banda de 137 MHz). En la Sección 2.2.3 se detallan los fundamentos de las modulaciones realizadas en el módulo MIRP.

Las imágenes APT transmitidas siguen un sistema de organización estandarizado con la finalidad de localizar los elementos de la imagen. Mediante la Figura 2.5 se pretende ilustrar la distribución horizontal de los bloques que constituyen la imagen. En esta figura se distinguen dos canales, el A y el B, que corresponden a la primera mitad de la línea y la segunda mitad, respectivamente. A su vez, cada línea está compuesta por 2080 palabras y, por tanto, en cada canal se distribuyen 1040 palabras. Además, en este formato se transmiten 120 líneas por minuto o, dicho en otras palabras, se transmite una línea cada 0.5 segundos. Por otro lado, las imágenes se dividen horizontalmente en tramas, las cuales están formadas por 16 bloques de 8 líneas cada una. De tal forma que cada trama está compuesta por un total de 128 líneas. Las tramas se explican más detalladamente en la Figura 2.7.

Debido a las diversas funciones de las palabras que pertenecen a una misma línea se produce

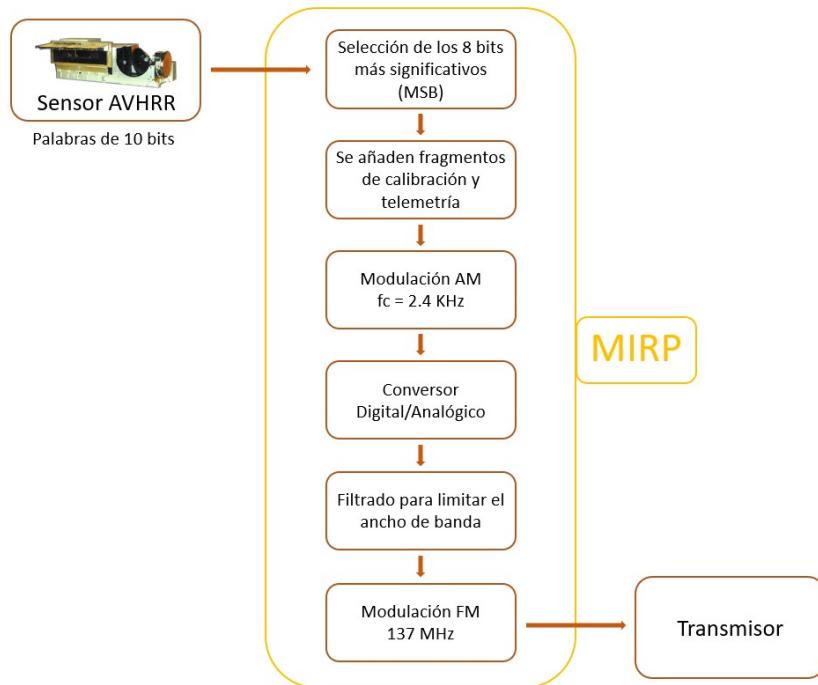


Figura 2.4: Esquema de procesado del módulo MIRP.

una agrupación en bloques de dichas palabras. Estos bloques son de utilidad en la obtención de información de la imagen meteorológica y reciben los nombres de sincronización, marca temporal, datos y telemetría.

La **sincronización** está formada por 39 palabras situadas al inicio de cada canal (al inicio de la línea para el canal A y al inicio de la segunda mitad de la línea para el canal B). Para el canal A, se envían siete pulsos a 1040 Hz, mientras que en el canal B el tren de siete pulsos se envía a 832 Hz. En la Figura 2.6 se representan los bloques de sincronización de ambos canales, siendo la duración de cada pulso  $T = 1/4160$  segundos.

Las siguientes 47 palabras, después de las palabras de sincronización, se corresponden a las **marcas de tiempo**. Estas marcas se representan por líneas horizontales de un color blanco (o negro, según el canal) sobre una franja del color opuesto. El objetivo de las líneas horizontales es conocer la duración de la pasada del satélite, por tanto, estas líneas se repiten con un periodo de 60 segundos. Si el canal representado corresponde a luz visible el marcador es de color blanco y la franja de color negro, y en el caso de un canal infrarrojo, los colores representativos de la línea horizontal y la franja son a la inversa del canal visible.

El conjunto de **datos** que muestra la imagen de la superficie terrestre es el formado por un

## CAPÍTULO 2. SATÉLITES METEOROLÓGICOS Y SU IMPORTANCIA EN LOS ESTUDIOS MEDIOAMBIENTALES

---

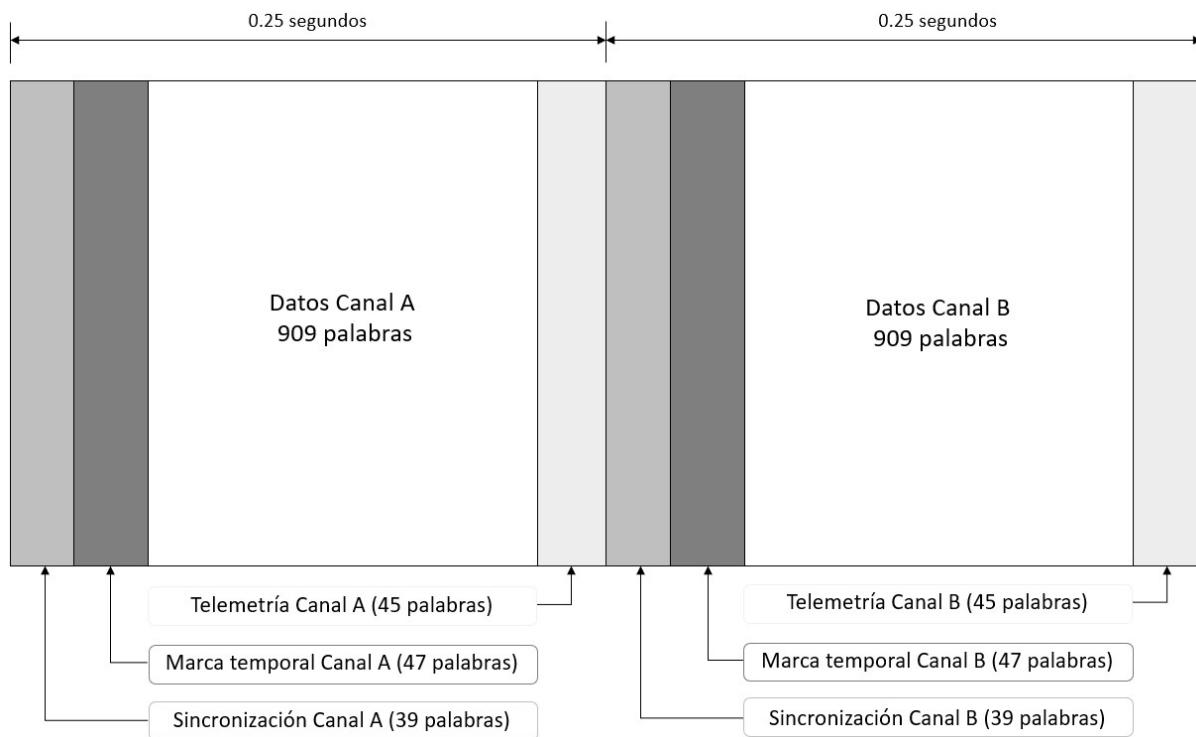


Figura 2.5: Estructura del formato de la señal APT.

total de 909 palabras en cada canal, situadas después de las palabras de marca temporal. Las palabras representan un valor en la escala de grises. En un canal de luz visible el color negro representa el agua, el blanco las nubes y el gris la tierra. Sin embargo, en un canal infrarrojo el blanco representa las zonas frías y el negro las zonas cálidas.

Y, por último, las 45 palabras restantes de cada media línea son las que aportan información sobre la **telemetría** de la imagen. Cada bloque situado en el interior de la trama de telemetría tiene una función asignada, descrita en la Tabla 2.3.

Bloques	Objetivo
1-8	Incremento de la intensidad de la mínima a la máxima, con pasos de 1/8
9	Mínima intensidad, tensión cero (negro)
10-15	Valores de codificación del sensor
16	Identifica el canal transmitido

Tabla 2.3: Información de los bloques de telemetría.

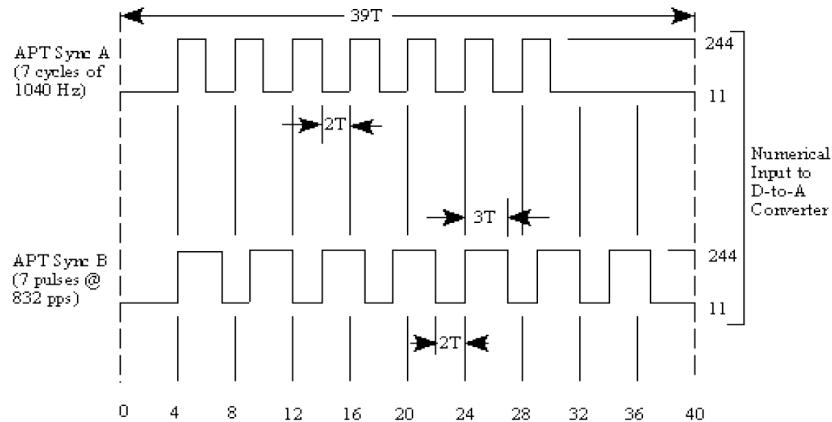


Figura 2.6: Estructura de las tramas de sincronización de los canales A y B [9].

En la Figura 2.7 se ilustra la distribución horizontal de la imagen APT. En ella se pueden observar los 16 bloques de una trama.

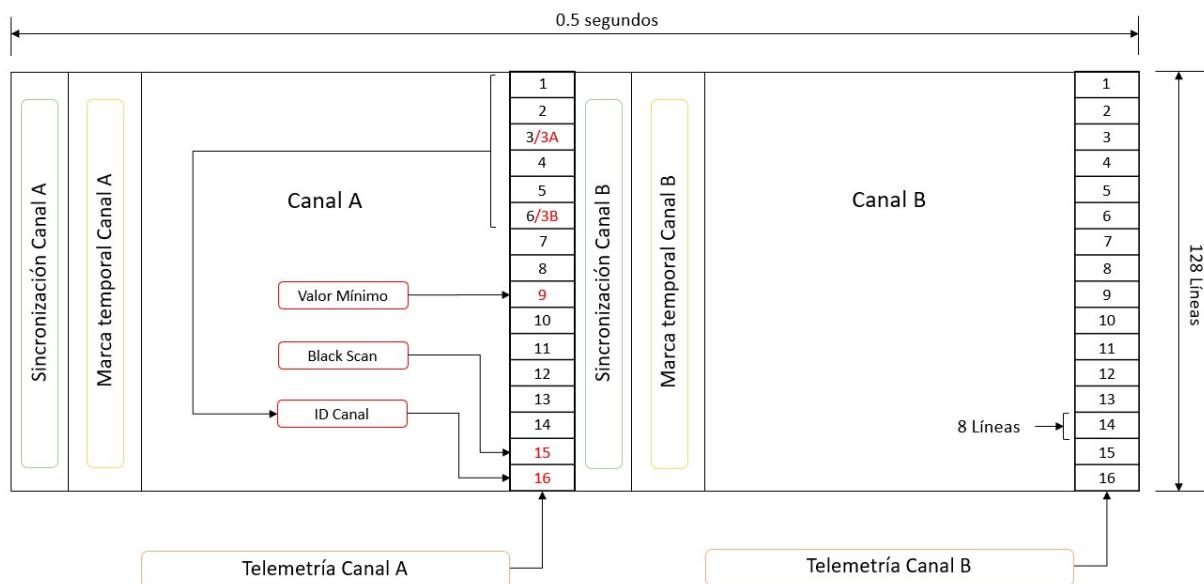


Figura 2.7: Trama de la señal APT.

Cabe destacar que los bloques del 1-14 son iguales en ambos canales, debido a que son valores preestablecidos. Por otro lado, el bloque 15 identifica al *black scan* que representa el valor cuando el sensor apunta a un cuerpo negro y puede sufrir variaciones según el canal. Con el objetivo de identificar el canal que se está transmitiendo, el bloque 16 repite uno de los bloques del 1 al 6, que representa al canal con el mismo número. En el sensor AVHRR-3 se añade el sexto canal, con el nombre de 3B, por tanto, el bloque que lo identifica es el número 6.

## CAPÍTULO 2. SATÉLITES METEOROLÓGICOS Y SU IMPORTANCIA EN LOS ESTUDIOS MEDIOAMBIENTALES

---

En la Figura 2.8 se puede observar un fragmento de una imagen en formato APT decodificada en la aplicación de escritorio WXtoImg [13]. En la imagen se han señalado las franjas de sincronización, las marcas temporales y las tramas de telemetría de cada canal.

Analizando la primera mitad de la imagen, se observa la franja de sincronización situada a la izquierda que hace referencia al primer canal. Como se ha explicado anteriormente, las franjas de sincronización son diferentes para el canal A y el canal B y, además, por la distancia entre las líneas verticales se puede deducir que esta primera semi-imagen pertenece al canal A y la semi-imagen derecha hace referencia al canal B.

Las marcas temporales indican que el fragmento de imagen ha sido tomado en aproximadamente dos minutos, debido a que se observan dos líneas horizontales. También se puede extraer información del tipo de canal observando el color predominante en la franja de las marcas temporales. El canal A es un canal de luz visible (o infrarrojo cercano) debido a que el color de la franja es negro, sin embargo, el canal B hace referencia a un canal de infrarrojo debido al color blanco en la marca temporal.

Por último, se pueden analizar las marcas de telemetría de ambas semi-imágenes, recuadrados los 16 bloques en color verde. El último bloque de la trama es el que determina el canal que está transmitiendo el sensor y, por lo tanto, en el canal A se transmite el canal 2 y en el canal B se transmite el 4. Ambos canales son coherentes con la información extraída de las marcas temporales, debido a que el canal 2 es infrarrojo cercano y el canal 4 es infrarrojo (ver Tabla 2.2).

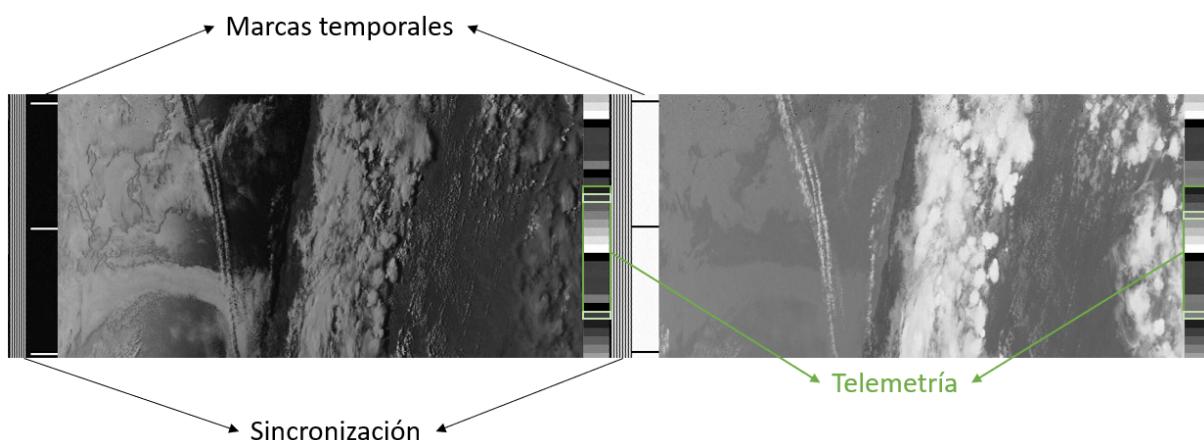


Figura 2.8: Ejemplo del formato de la señal APT sobre una imagen real.

### 2.2.3. Modulación de la señal

Con el fin de realizar una correcta demodulación de la señal recibida (Sección 4.5.2) es necesario conocer la modulación que se ha realizado sobre la señal APT para su transmisión. Este tipo de señales reciben dos modulaciones diferentes: modulación AM y modulación en FM.

La modulación AM es una técnica en la que la amplitud de la señal transmitida varía según los niveles de tensión de la señal. En AM se definen dos señales de entrada: la señal moduladora, en el caso de este proyecto la señal que contiene la información de las líneas,  $m(t)$ , y la señal portadora definida como una señal sinusoidal,  $c_{am}(t)$ .

En primer lugar, la señal moduladora se normaliza a valores entre 1 y -1. Y, además, se suma una componente en continua para obtener una señal positiva en todos sus valores.

En (2.1) se muestra la señal portadora, donde su frecuencia se representa como  $f_{am}$ , cuyo valor es 2400 Hz, y su amplitud es  $A_{am}$ .

$$c_{am}(t) = A_{am} \cos(\omega_{am}t) \rightarrow \omega_{am} = 2\pi f_{am} \quad (2.1)$$

La señal de salida de la modulación en amplitud es:

$$s_{am}(t) = A_{am} [1 + k_a m(t)] \cos(\omega_{am}t) \quad (2.2)$$

donde el índice de modulación,  $k_a$ , es la relación entre la amplitud de la portadora ( $A$ ) y la amplitud pico de la moduladora ( $M$ ).

$$k_a = \frac{M}{A} = 87\% \pm 5\% \quad (2.3)$$

La segunda modulación utilizada es FM. Dicha técnica no varía la amplitud de la señal, sino que varía la frecuencia de la señal de salida. Un mayor nivel de tensión se corresponde con un aumento en la frecuencia de la señal. Las señales de entrada a la modulación FM son la señal de salida AM, señal moduladora, y la señal portadora, correspondiente a una señal sinusoidal con amplitud  $A_{fm}$ .

La señal portadora tiene una frecuencia central,  $f_{fm}$ , entre 137.1 y 137.9125 MHz y una desviación de frecuencia de  $\Delta f = 17$  kHz (2.4).

$$c_{fm}(t) = A_{fm} \cos(\omega_{fm}t) \rightarrow \omega_{fm} = 2\pi f_{fm} \quad (2.4)$$

Y, por tanto, la señal de salida de la modulación en frecuencia es:

$$s_{fm}(t) = A_{fm} \cos \left[ w_{fm}t + 2\pi \Delta f \int_0^t s_{am}(\tau) d\tau \right] \quad (2.5)$$

Finalmente, para el correcto filtrado de la señal en el proceso de recepción es necesario conocer su ancho de banda. Este parámetro se calcula a partir de la *regla de Carson*, mediante el valor de la desviación de frecuencia,  $\Delta f$ , y el ancho de banda de la señal moduladora,  $f_{am}$  [14].

$$BW = 2(\Delta f + f_{am}) = 2(17 + 2.4)kHz = 38.8kHz \quad (2.6)$$

Por otro lado, el *efecto Doppler* influye en la recepción de la señal. Este efecto produce una variación en la frecuencia debido al movimiento relativo del objeto transmisor, el satélite NOAA, respecto el observador, la estación terrestre. El cálculo de esta variación se realiza mediante (2.8), donde la variable  $v$  hace referencia a la velocidad del satélite;  $f$  es la frecuencia de transmisión de la señal APT;  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $3 \cdot 10^8$  m/s, y  $\theta$  es el ángulo formado por el vector velocidad del satélite y el radio vector transmisor-receptor. La desviación en frecuencia alcanza su máximo cuando el satélite es visible desde la estación terrena, dado que el ángulo  $\theta$  es mínimo. Por tanto, debido al efecto *Doppler*, se alcanza una desviación de frecuencia del valor 3 kHz, incrementando el ancho de banda en recepción un total de 6 kHz (2.7) [15].

$$BW = 38.8 + 6 = 44.8kHz \quad (2.7)$$

Finalmente, el ancho de banda en recepción debe ser superior a 44.8 kHz. Este efecto no solo afecta al ancho de banda de recepción, también influye en la geometría de la imagen produciendo desplazamientos en las filas de la imagen APT.

$$\Delta f_{Doppler} = \frac{v}{c} f \cos(\theta) \quad (2.8)$$

El ancho de banda de la recepción debe ser como mínimo 44.8 kHz, como se acaba de explicar. No obstante, se ha dejado una banda de guarda a cada lado para asegurar una correcta recepción, obteniendo finalmente un ancho de banda de 50 kHz.

Por último, en la Figura 2.9 se puede observar una explicación gráfica de las modulaciones en amplitud (definida en la primera columna) y en frecuencia (gráficos de la segunda columna). La primera fila representa la señal de datos o señal moduladora y la segunda fila define la señal portadora. En la modulación AM se observa como la amplitud de la señal de salida varía según la señal moduladora, obteniéndose mayor amplitud a la salida a mayor nivel de tensión en la señal. Por otro lado, en la modulación FM la amplitud de la señal de salida permanece constante en todos sus valores, en este caso, la variación se produce en la frecuencia. Como se ha explicado

## CAPÍTULO 2. SATÉLITES METEOROLÓGICOS Y SU IMPORTANCIA EN LOS ESTUDIOS MEDIOAMBIENTALES

---

anteriormente, a mayor nivel de tensión en la señal moduladora mayor frecuencia se obtiene en la señal de salida.

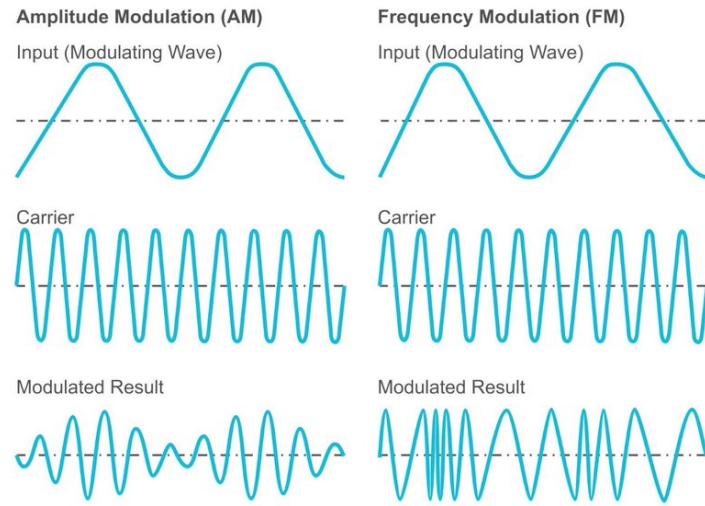


Figura 2.9: Ejemplo de la modulación en amplitud (AM) y en frecuencia (FM) [16].

# **Capítulo 3**

## **Sistema de recepción**

En este capítulo se analizan los sistemas de recepción que constituyen la estación receptora del presente proyecto. Inicialmente se ha detallado en el Capítulo 2 la señal APT transmitida por los satélites NOAA, para continuar estudiando en las siguientes secciones el equipo y sistemas necesarios para recibir correctamente la señal.

La estación receptora del proyecto está compuesta por los elementos esquematizados en la Figura 3.1. El inicio de la transmisión comienza en el satélite que envía la señal APT procesada por su sistema de transmisión (ver Figura 2.3). La señal es recibida por el componente de mayor relevancia de la estación receptora, la antena. La antena receptora obtiene la señal transmitida por el satélite y la guía mediante el cable de conexión hacia el pre-amplificador, que como su nombre indica, mejora la calidad de la señal haciendo frente a las posibles pérdidas de transmisión. Después de la amplificación, la señal es demodulada en frecuencia obteniendo la señal AM. Finalmente, la señal resultante se decodifica y procesa en el ordenador a través de la aplicación desarrollada en este proyecto, *NOAAApp*, consiguiendo la imagen APT captada por el satélite.

A continuación, se presentan y analizan detalladamente los componentes de la estación receptora, anteriormente mencionados. En las siguientes secciones se realiza un estudio de las características del enlace de transmisión y sus necesidades, con el fin de diseñar e implementar un sistema de recepción de las imágenes vía satélite.

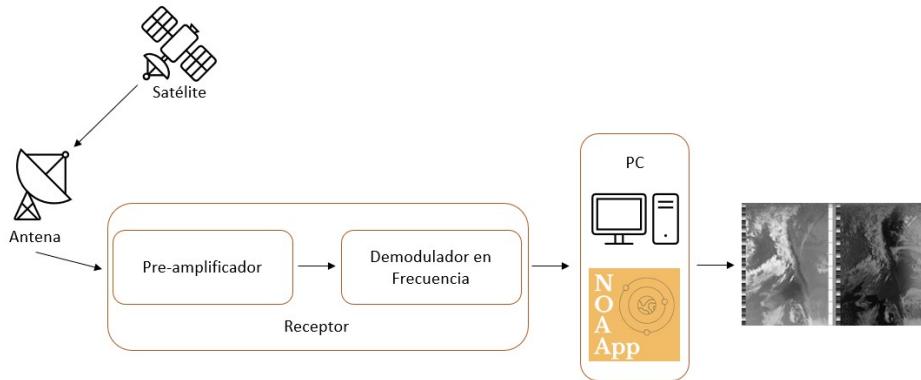


Figura 3.1: Esquema de recepción de la señal APT.

### 3.1. Antenas para la recepción de satélites polares en formato APT

La antena de recepción es el equipo encargado de recibir la señal APT transmitida por los satélites de la constelación NOAA y, por tanto, es necesario el análisis previo de las características orbitales de los satélites, con la finalidad de caracterizar los parámetros de diseño de la antena utilizada. A partir de algunas características conocidas del enlace de transmisión como la frecuencia de trabajo, el tipo de órbita, la posición y orientación del satélite, se puede obtener información relevante sobre la antena que se quiere construir, como por ejemplo su tamaño, la potencia de transmisión, la sensibilidad del receptor, el diagrama de radiación y la polarización. A continuación, se analizan en detalle los parámetros básicos de una antena, con el objetivo de conocer las necesidades de la antena receptora de este proyecto.

#### 3.1.1. Tamaño y longitud de onda de la antena receptora

Por un lado, la transmisión de la señal APT se realiza en la banda de 137 MHz, variando según la serie del satélite NOAA. Mediante la relación existente entre la frecuencia y la longitud de onda se puede estudiar el tamaño correspondiente de la antena. Por medio de (3.1) se establece la relación entre la longitud de onda, representada con la variable  $\lambda$ , y la frecuencia. Una vez obtenida la longitud de onda del enlace, el tamaño de la antena receptora debe ser de una longitud próxima a  $\lambda/2$ . Este valor es característico en las antenas de hilo omnidireccionales que se utilizan en estas bandas de frecuencia.

$$\lambda = \frac{c}{f} \left[ \frac{m/s}{Hz} \right] = \frac{3 \cdot 10^8}{137 \cdot 10^6} = 2.189m \quad (3.1)$$

### 3.1.2. Polarización

La polarización de una antena se define como la figura creada por el extremo del vector de campo radiado y su sentido de giro en función del tiempo y para una dirección determinada. Es importante destacar la posición del observador, situado detrás de la antena y mirando hacia la dirección de máxima radiación, ya que determina el sentido de giro de la polarización.

En el estudio de la polarización es relevante el análisis de la componente del campo eléctrico de la onda electromagnética que se descompone a su vez en dos elementos, definidos en (3.2)

$$\vec{E} = E_\theta \hat{\theta} + E_\phi \hat{\phi} \left\{ \begin{array}{l} E_\theta = |E_\theta| \cdot e^{j\delta_\theta} \\ E_\phi = |E_\phi| \cdot e^{j\delta_\phi} \end{array} \right\} \rightarrow \begin{array}{l} E_{\theta i} = |E_\theta| \cdot \cos(\omega t + \delta_\theta) \\ E_{\phi i} = |E_\phi| \cdot \cos(\omega t + \delta_\phi) \end{array} \quad (3.2)$$

donde  $\delta = \delta_\phi - \delta_\theta$  representa el desfase de la componente  $E_\phi$  respecto a  $E_\theta$ . Despejando el tiempo de las componentes instantáneas del campo eléctrico se obtiene la elipse de polarización representada en la Figura 3.2.

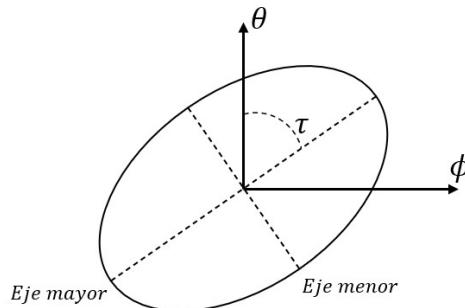


Figura 3.2: Elipse de polarización.

El tipo y sentido de polarización es un concepto importante en las comunicaciones por satélite y deben ser iguales en el receptor y el transmisor. La polarización puede ser de tipo lineal, circular o elíptica según la figura geométrica que reproduce el extremo del vector de campo eléctrico a lo largo del tiempo [17].

La **polarización lineal** se produce cuando el vector del campo eléctrico se mueve a lo largo de una recta y, por tanto, se cumple alguna de las siguientes características:

1.  $\delta = 0$

$$2. E_\theta = 0$$

$$3. E_\phi = 0$$

La **polarización circular** se obtiene cuando el extremo del vector del campo eléctrico dibuja una circunferencia. Esta polarización se observa cuando se produce la siguiente propiedad:

$$1. |E_\theta| = |E_\phi|$$

y, además, se observa una de estas características:

$$1. \delta = 90^\circ \text{ (Left Hand Circular Polarized (LHCP))}$$

$$2. \delta = -90^\circ \text{ (Right Handed Circular Polarized (RHCP))}$$

En el caso en el que no se cumplan ninguna de las características anteriores, el extremo del vector del campo eléctrico traza una elipse y, por consiguiente, se habla de **polarización elíptica**. En la Figura 3.3 se pueden observar los tipos de polarización descritos anteriormente.

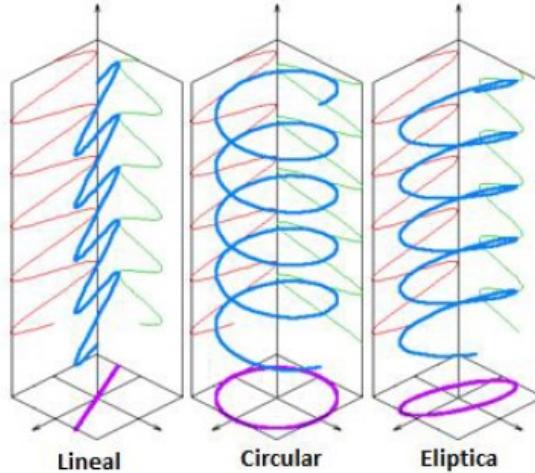


Figura 3.3: Tipos de polarización.

Los satélites NOAA transmiten su señal APT con una polarización circular a derechas (RHCP) y, por tanto, la antena de recepción que se debe usar para la comunicación satelital óptima debe ser del mismo tipo.

Finalmente, el parámetro **relación axial**,  $AR$ , es utilizado para caracterizar la relación entre el eje menor y el eje mayor de la elipse de polarización. Este parámetro toma valores próximos a la unidad en polarizaciones circulares y para polarizaciones de tipo lineal es infinito.

### 3.1.3. Directividad y diagrama de radiación

La ganancia de una antena es la relación que existe entre la intensidad de radiación radiada por la antena en una determinada dirección y la intensidad de radiación radiada por una antena isotrópica<sup>1</sup>. Por otro lado, la **directividad** representa la potencia radiada por la antena sin tener en cuenta las pérdidas producidas por la dispersión de potencia de la misma. Por tanto, la diferencia reside en que la ganancia tiene en cuenta las pérdidas de dispersión, mientras que la directividad define la potencia radiada por la antena sin tener en cuenta las pérdidas [19]. Ambas relaciones se miden en decibelios respecto la ganancia, o directividad, de una antena isotrópica, que radia igual en todas las direcciones del espacio (dBi). En (3.3) se relacionan los conceptos de ganancia  $G(\theta, \phi)$  y directividad  $D(\theta, \phi)$  a partir de la eficiencia  $\mu$ . La eficiencia es un valor entre 0 y 1 que representa la potencia radiada respecto la potencia entregada a la antena.

$$G(\theta, \phi) = \mu \cdot D(\theta, \phi) \quad (3.3)$$

El diagrama de radiación es la representación de la intensidad de radiación de una antena en todo el espacio. En esta representación el lóbulo o haz principal es el margen angular en torno a la dirección de mayor intensidad de radiación. En otras palabras, la directividad representa la capacidad de una antena para concentrar su intensidad de radiación en una determinada dirección del espacio y, por tanto, una antena es más directiva cuanto más estrecho sea su lóbulo principal. Por otro lado, se habla de una antena omnidireccional cuando su intensidad de radiación es directiva en un plano e isotrópica en el plano perpendicular, ver Figura 3.4.

Por otra parte, en la Sección 2.1 se ha expuesto el tipo de órbita que recorren los satélites NOAA como polar, LEO, quasi-circular y helio-síncrona. Los satélites en estas órbitas describen trayectorias de gran velocidad y, por tanto, puede ser necesaria la instalación de un sistema de seguimiento en la antena, con el fin de captar durante el mayor tiempo posible la señal transmitida. Un detalle relevante es el *paso*<sup>2</sup> del satélite sobre la localización donde se va a recibir la señal. Esta información se debe conocer con el fin de obtener una mejor recepción y hallar menores problemas en la orientación de la antena. Por ello, es necesario la instalación de los sistemas de posicionamiento para las antenas con un diagrama de radiación más directivo, ver Sección 3.1.4.

---

<sup>1</sup>Antena isotrópica: es una antena ideal que transmite la misma intensidad de radiación en todas las direcciones espaciales [18]

<sup>2</sup>Paso satelital: periodo en el que el satélite se encuentra por encima del horizonte local y es posible recibir la señal que está transmitiendo.

## CAPÍTULO 3. SISTEMA DE RECEPCIÓN

---

Sin embargo, las antenas omnidireccionales no requieren del uso de estos sistemas y se instalan fijas, dado que radian (o reciben) por igual en todas las direcciones del espacio.



Figura 3.4: Ejemplos de diagrama de radiación de una antena [20].

### 3.1.4. Antenas directivas y sistemas de posicionamiento/seguimiento

Las antenas con un diagrama de radiación directivo son las que concentran la mayor parte de la energía radiada en una dirección determinada, obteniendo un gran valor de ganancia en esta dirección y perdiéndola, en consecuencia, en las otras direcciones. En este tipo de antenas se necesita un sistema de posicionamiento para orientar su haz principal en la dirección del paso del satélite, ver Figura 3.3.

En la banda de frecuencia Very High Frequency (VHF), el uso de las antenas *Yagi-Uda* y las hélices en modo axial es muy habitual dado que presentan un diagrama de radiación directivo. A continuación, se presentan las características principales de la antena *Yagi-Uda* y *Cross Yagi-Uda*. Ambas antenas han sido simuladas a partir del programa *Feko* [21] para mostrar sus diagramas de radiación y otras propiedades.

#### Antena Yagi-Uda

La antena Yagi-Uda está compuesta por un conjunto de dipolos dispuestos en paralelo. El diseño y la agrupación de los dipolos, que forman la antena, están creados para la obtención de un diagrama de radiación directivo. El dipolo conectado a la alimentación recibe el nombre de elemento activo o conducido, normalmente el punto de alimentación se encuentra en el centro de este elemento. Delante del elemento activo se encuentran los elementos parásitos o directores, que ayudan a crear una antena más directiva gracias al acoplamiento en fase del campo electromagnético producido en el elemento activo con el campo inducido en estos componentes parásitos. Aumentar el número de elementos directores de la antena produce un aumento del

## CAPÍTULO 3. SISTEMA DE RECEPCIÓN

---

tamaño de la misma y, por tanto, una mayor ganancia. El último dipolo de la antena, que pertenece al grupo de los elementos parásitos, se encuentra detrás de la alimentación y recibe el nombre de reflector. La longitud del dipolo activo es aproximadamente la mitad de la longitud de onda, mientras que, el tamaño del reflector es ligeramente superior [22]. Sin embargo, la longitud de los elementos parásitos es ligeramente inferior al elemento activo. En la Figura 3.5 se representan los componentes de la antena Yagi-Uda. En esta imagen se puede observar la diferencia de longitud de los dipolos, comentada anteriormente. Por otro lado, cabe destacar la separación existente entre los dipolos que forman la antena, dado que la distancia entre el activo y el reflector es superior a la distancia del activo respecto los elementos directores.

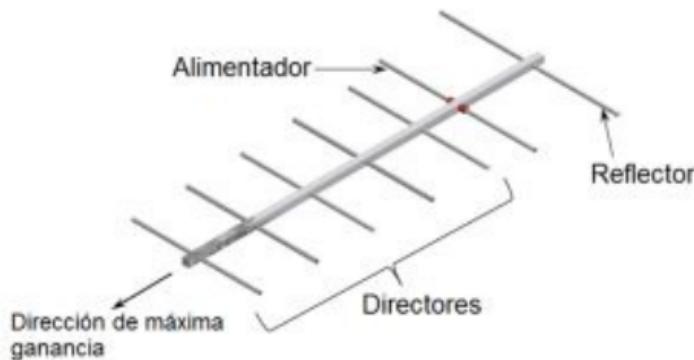


Figura 3.5: Elementos principales de la antena Yagi-Uda [23].

Por otro lado, para la simulación de diferentes tipos de antenas se ha utilizado el software Feko. Con este programa de simulación de electromagnetismo se ha creado una antena Yagi-Uda con tres elementos directores, un elemento alimentador y un reflector, ver Figura 3.6.

Para este ejemplo de antena Yagi se representa en la Figura 3.7, obtenida mediante el simulador, el diagrama de radiación que presenta la antena. Se puede observar en la Figura 3.7 (a) como el haz principal de este diagrama está centrado en  $0^\circ$  y concentra su radiación en esta dirección espacial. Por otro lado, en la Figura 3.7 (b) se representa en 3 dimensiones el diagrama de radiación sobre la antena Yagi-Uda. En esta imagen se muestra como la dirección principal de la radiación es la dirección en la que se disponen los dipolos directivos. Este tipo de antena es muy directiva y, por tanto, necesita un sistema de apuntamiento del haz principal hacia el paso del satélite para recibir la señal.

Por último, este tipo de antenas tienen una polarización lineal, sin embargo, en la Sección 3.1.2

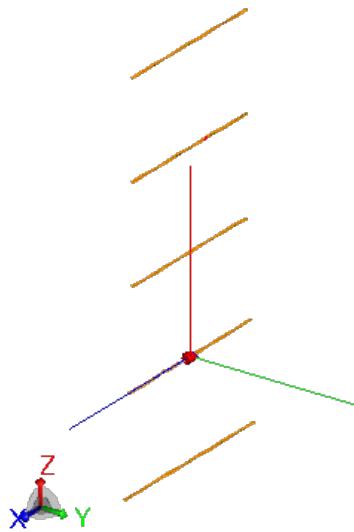
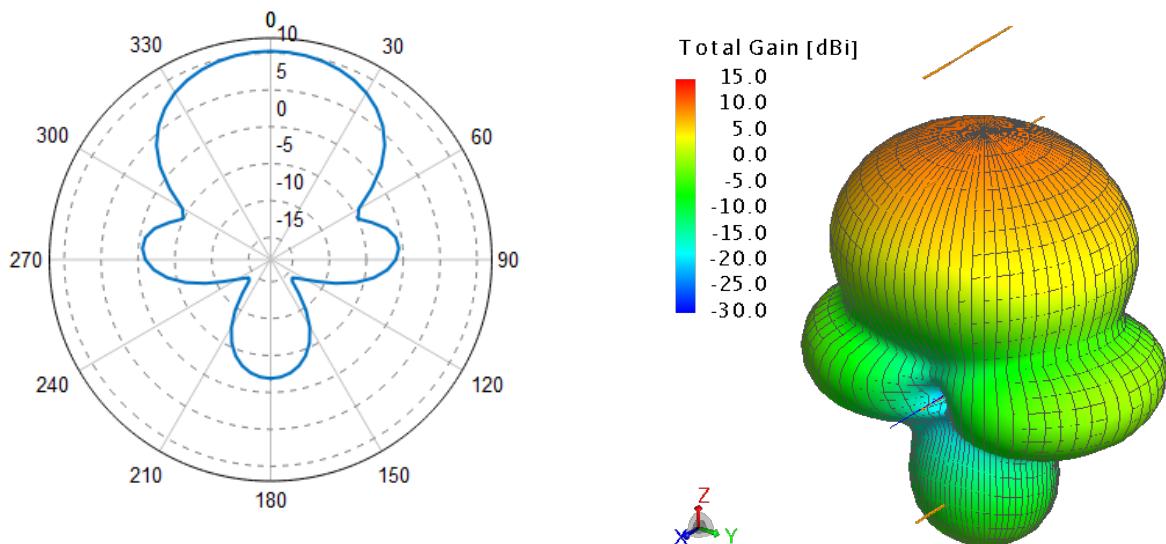


Figura 3.6: Simulación de una antena Yagi-Uda.



(a) Diagrama de radiación en el plano

$$\phi = 90^\circ.$$

(b) Diagrama de radiación sobre la antena.

Figura 3.7: Ejemplo de diagrama de radiación de una antena Yagi-Uda.

se ha explicado que los satélites NOAA transmiten con una polarización circular a derechas (RHCP). Por tanto, para una correcta comunicación entre el satélite y la antena se debe obtener una polarización circular. Para ello, se procede a la unión de dos antenas tipo Yagi-Uda colocadas ortogonalmente y con un desfase en su alimentación de  $90^\circ$ . Esta antena recibe el nombre de *Cross-Yagi* y se representa en la Figura 3.8. En esta simulación se ha mantenido la longitud de

los dipolos creados en la antena Yagi simple.

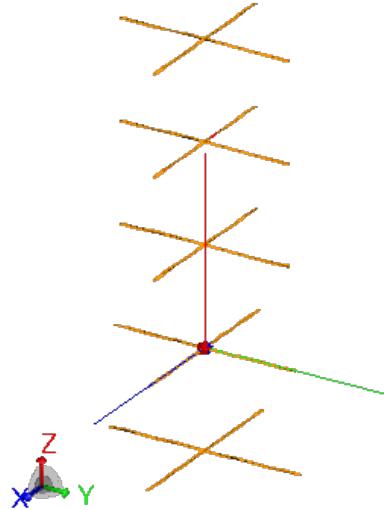
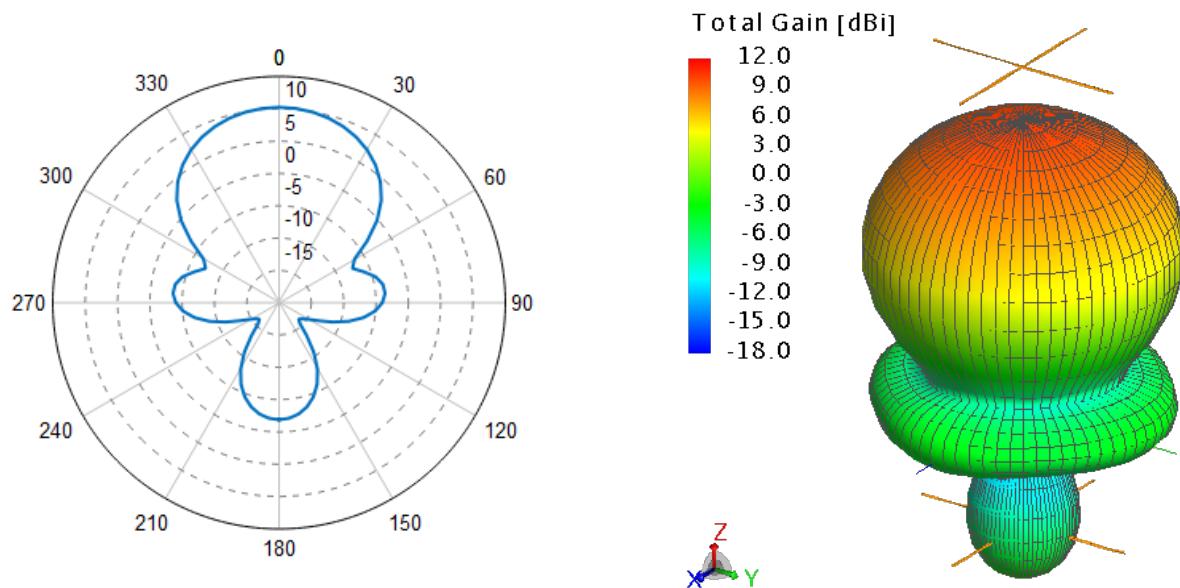


Figura 3.8: Simulación de una antena Cross Yagi-Uda.

En la Figura 3.9 se representa el diagrama de radiación de esta antena en el que no se observa un cambio en la directividad. El haz principal de la antena se sitúa en la dirección de  $0^\circ$  como en el ejemplo de la antena Yagi simple.



(a) Diagrama de radiación en el plano

$$\phi = 90^\circ.$$

(b) Diagrama de radiación sobre la antena.

Figura 3.9: Ejemplo de diagrama de radiación de una antena Cross Yagi-Uda.

Con la estructura de la *Cross-Yagi* se obtiene una antena con polarización circular capaz de recibir la señal transmitida por los satélites NOAA, mediante un correcto sistema de seguimiento y posicionamiento. En la Figura 3.10 se compara la relación axial de la antena *Cross-Yagi* y de la antena *Yagi-Uda*. Como se ha explicado anteriormente, la relación axial es el parámetro que caracteriza la polarización de la antena, siendo un valor cercano a 1 la representación de la polarización circular. Por consiguiente, se observa como la antena *Yagi-Uda* mantiene un valor uniforme en cero, que presenta su polarización lineal. Sin embargo, se observan más variaciones en la relación axial de la antena *Cross-Yagi*, obteniéndose una polarización circular en la dirección del máximo.

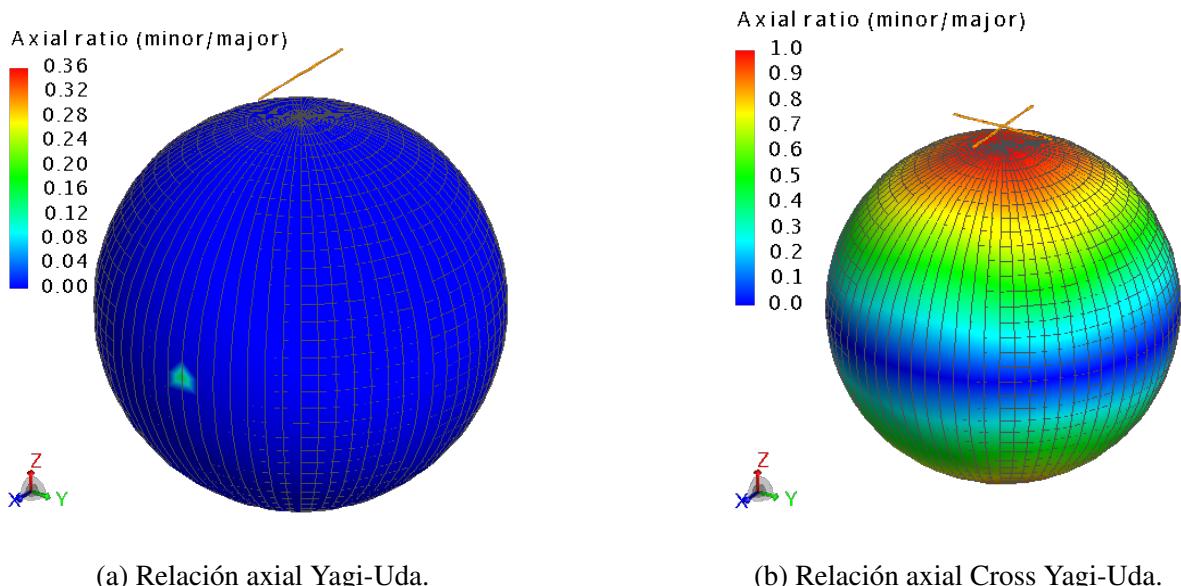


Figura 3.10: Ejemplo de la polarización de la antena Yagi-Uda y Cross Yagi-Uda.

### Sistemas de posicionamiento de la antena

En esta sección se analizan antenas con un diagrama de radiación direccional, que implica la necesidad de orientar el haz principal de radiación en la dirección en la que se encuentra situado el satélite en su paso en cada momento. Esto conlleva un sistema de monitorización del paso satelital y un equipo de posicionamiento que apunta la antena según la posición del satélite obtenida en el seguimiento.

Inicialmente, es necesario conocer el paso del satélite en la posición en la que se va recibir la señal, con el fin de comenzar el proceso de recepción y orientar la antena correctamente. Esta

## CAPÍTULO 3. SISTEMA DE RECEPCIÓN

información se puede extraer de manera gratuita a partir de algunas páginas web, que necesitan la latitud y longitud de la estación receptora y el satélite objetivo del seguimiento. A continuación, se presentan dos alternativas.

**Heavens Above** es una página *web* cuyo objetivo es proporcionar predicciones del paso de los satélites que orbitan la Tierra [24]. Es posible obtener el paso de la International Space Station (ISS), de satélites de radiocomunicaciones o cometas. Para comenzar, es necesario introducir las coordenadas de la localización donde se va a colocar la antena de recepción y seleccionar en el catálogo el satélite deseado. Una vez introducidos los datos, se presentan los días y horas en los que el satélite pasa por la localización dada. Además, se incluyen algunos parámetros como las horas, alturas y grados del acimut que caracterizan el paso del satélite en su salida, cuando alcanza la altura máxima y cuando se pone. Esta *web* también proporciona información sobre el tipo de órbita que recorren los satélites. Por último, toda esta información se puede obtener también desde una aplicación de móvil gratuita. En la Figura 3.11 se muestra la interfaz de esta página *web* para predecir el pase del satélite NOAA-18 el día 11 de marzo de 2022, en Fuenlabrada.

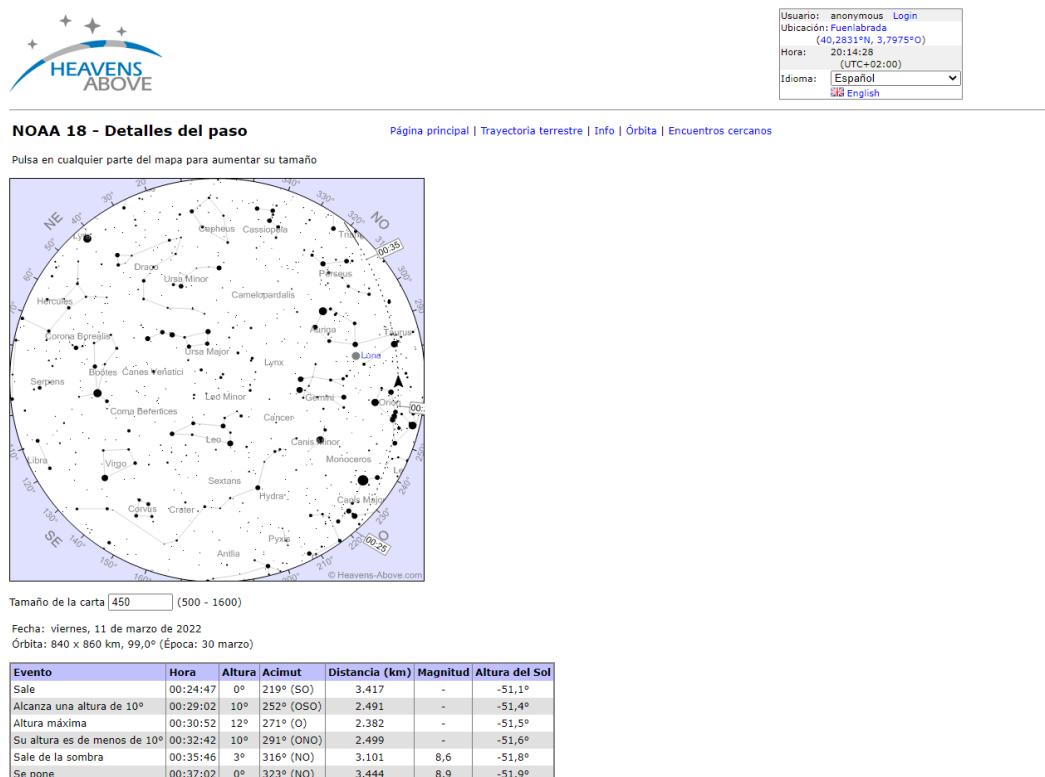


Figura 3.11: Interfaz de la página web Heavens Above [24].

## CAPÍTULO 3. SISTEMA DE RECEPCIÓN

---

La página web ***Orbitron*** es otra alternativa para conocer la predicción del paso del satélite [25]. Al igual que *Heavens Above*, es necesario seleccionar el satélite del cual se quiere conocer el paso e introducir las coordenadas de la posición en la que se va a recibir. Las funciones de esta aplicación son similares a las presentadas anteriormente. Además, la aplicación aporta y actualiza las líneas en formato Two-Line Element (TLE) del satélite. El formato de datos TLE presenta los elementos orbitales que caracterizan la órbita y la posición del satélite, como el número de referencia del satélite, la excentricidad de su órbita o cuándo se tomaron los datos. Finalmente, esta aplicación está disponible para los sistemas *Windows*.

Por otro lado, algunas de las aplicaciones cuyo objetivo es la decodificación y procesado de las imágenes APT, ofrecen al usuario las herramientas necesarias para realizar un seguimiento de los satélites implicados en la recepción (ver Sección 3.3).

Una vez conocido el paso del satélite, es necesario orientar la antena receptora respecto el satélite. Por ello, se instalan los equipos de posicionamiento en la antena, con el objetivo de obtener la orientación apta para recibir la señal transmitida. En el posicionamiento de la antena se distinguen dos tipos de movimiento según el eje en el que se produce la rotación. El **ángulo de elevación** es el ángulo formado por la recta imaginaria que une el haz principal de la antena y el satélite con respecto a la horizontal, Figura 3.12 (a). En este caso, el eje en el que se produce la rotación es el eje horizontal. Por otro lado, el **acimut** es el ángulo existente entre la proyección horizontal de la línea imaginaria, que une el haz principal de la antena y el satélite, y el punto cardinal Norte. Este ángulo se ve representado en la Figura 3.12 (b) y su valor implica una rotación sobre el eje vertical de la antena.

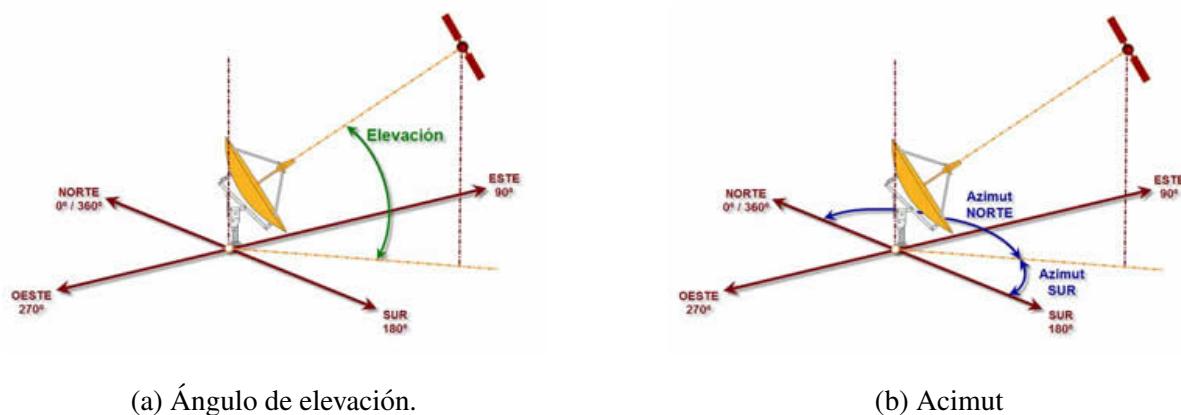


Figura 3.12: Representación del ángulo de elevación y el acimut [26].

## CAPÍTULO 3. SISTEMA DE RECEPCIÓN

---

Por un lado, existen los **sistemas de posicionamiento con movimiento único en el acimut**, que mantienen fijo el ángulo de elevación de la antena. Por consiguiente, es necesario que el diagrama de radiación de estas antenas no sea muy directivo, ya que, debe abarcar los  $90^\circ$  del ángulo de elevación, considerando que el sistema de rotación sobre el eje vertical abarque los  $360^\circ$ . Sin embargo, estos sistemas no son muy precisos debido a la rotación de un único eje, no obstante, esto reduce su precio siendo sistemas económicos para el uso de radioaficionados.

Y, por otro lado, se dispone de los **sistemas de posicionamiento con movimiento en el ángulo de elevación y el acimut**, que son capaces de realizar el seguimiento continuo del satélite gracias a la rotación en el eje horizontal y vertical de la antena. Estos sistemas son recomendables para las antenas más directivas en las que se puede orientar con precisión el haz principal de radiación. La posible rotación en los dos ejes implica un aumento de su coste y complejidad y, por tanto, se crean equipos más sofisticados que orientan la antena con gran precisión. Por ello, este tipo de dispositivos son usados en comunicaciones por satélite donde es necesario una precisa orientación de la antena receptora, debido a que la potencia de la señal transmitida disminuye notablemente por las pérdidas de propagación del enlace.

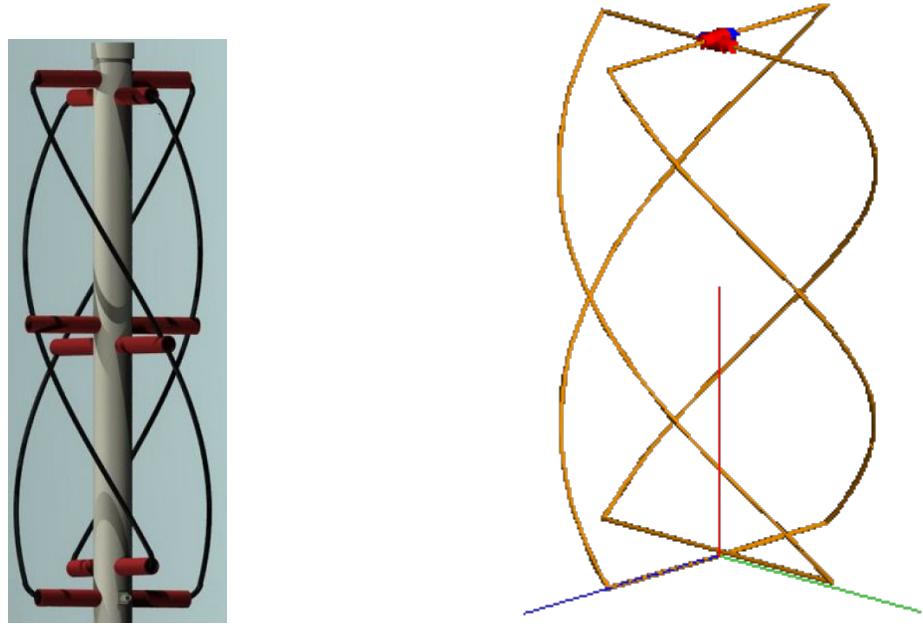
### 3.1.5. Antenas omnidireccionales

Las antenas omnidireccionales proporcionan una radiación directiva en un plano e isotrópica en el plano perpendicular, por ello, es la antena isótropa la única que radia de manera uniforme en las tres dimensiones. Habitualmente, las antenas omnidireccionales proporcionan una radiación uniforme en un plano de referencia, por lo que no es necesario un sistema de posicionamiento. En este proyecto se ha centrado el estudio en dos tipos de antenas utilizadas habitualmente en la recepción de imágenes meteorológicas de los satélites NOAA: la Antena Cuadrifilar Helicoidal (QFH) y la Double Cross (DC).

#### Antena Cuadrifilar Helicoidal

La antena QFH es la más recomendada por la literatura científica para la obtención de imágenes en formato APT, transmitidas por los satélites de órbita polar baja. En primer lugar, la antena está formada por dos espiras cuadradas sometidas a una torsión, con el fin de obtener un diagrama de radiación centrado en la vertical de la antena. La alimentación se realiza en la

parte superior de la antena con un desfase de  $90^\circ$  entre las espiras que produce una polarización circular. Por otro lado, la dirección de giro de la torsión de las espiras implica el giro de la polarización, por tanto, es necesario un giro al contrario de las agujas del reloj para obtener una polarización tipo RHCP. En la Figura 3.13(a) se representa la estructura de la antena QFH y, además, se puede observar la torsión de sus espiras.



(a) Ilustración de la antena QFH [27].

(b) Antena QFH en la simulación de Feko.

Figura 3.13: Estructura de la antena cuadrifilar helicoidal.

Como bien se ha explicado anteriormente, la antena QFH tiene un diagrama de radiación omnidireccional en el semi-espacio superior con una polarización circular a derechas. En la Figura 3.14 se muestra un ejemplo del diagrama de radiación de este tipo de antenas, simuladas mediante la herramienta Feko. Ambas figuras representan la ganancia de la antena, en dBi, a una frecuencia de 137.5 MHz. Como se puede observar, el máximo de la ganancia de la antena se encuentra en el cenit<sup>3</sup>, una posición óptima para la recepción de la señal transmitida por los satélites.

Por otro lado, el diagrama de radiación de la antena QFH es mucho menos directivo que el analizado para la antena Yagi-Uda, en la Figura 3.7 (a) y, por tanto, no sería necesaria la aplicación de un sistema de seguimiento para la orientación de la antena QFH en la recepción de

---

<sup>3</sup>Cenit: intersección de la vertical de un lugar con la esfera celeste, por encima de la cabeza del observador [28].

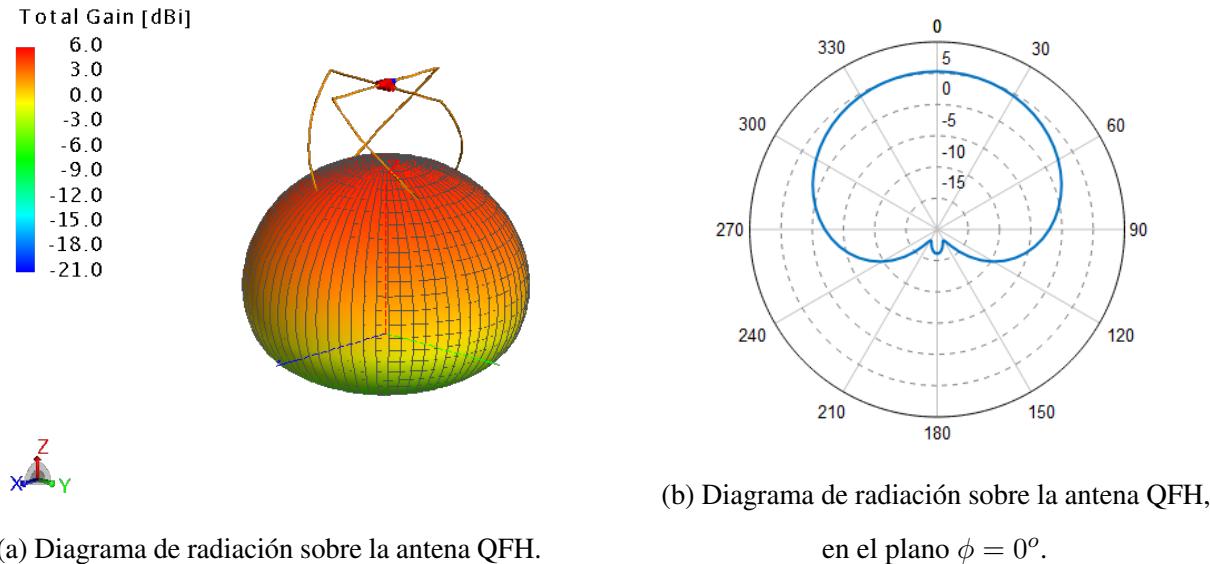


Figura 3.14: Diagrama de radiación de la antena QFH.

la señal.

Por último, la antena QFH se explica detalladamente en la Sección 4.3, donde se analizan los parámetros y características necesarias para la construcción de la antena y, del mismo modo, se describen los valores obtenidos en la simulación de la antena en el programa Feko.

### Antena Double Cross

La antena DC es, junto a la antena QFH analizada en el apartado anterior, una opción con buenas prestaciones para la recepción de señales APT. Esta antena está formada por cuatro dipolos, con los que se obtiene un diagrama de radiación omnidireccional en el semi-espacio superior y una polarización circular. Los dipolos se sitúan en los vértices de un cuadrado en el plano horizontal e inclinados respecto el eje vertical un ángulo de  $30^\circ$ . Los cuatro dipolos se agrupan en dos pares, en el que cada par está formado por dos dipolos paralelos. En la Figura 3.15 se observa la estructura de la antena DC y los dipolos que la constituyen.

Con el fin de obtener una polarización circular, la alimentación de los dos pares de dipolos debe estar desfasada  $90^\circ$  entre sí, al igual que se ha observado en la alimentación de la antena QFH.

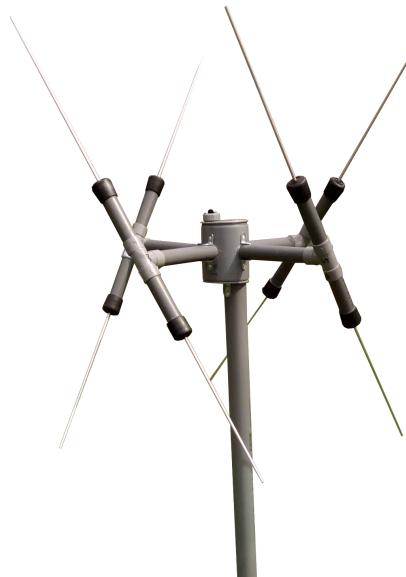


Figura 3.15: Estructura de la antena Double Cross [29].

## 3.2. Equipos de recepción

El segundo elemento de gran relevancia en las estaciones receptoras es el equipo de recepción, que es el encargado de demodular la señal recibida con el fin de obtener la señal modulada en AM. En la Figura 3.1, el componente *Demodulador en Frecuencia* hace referencia al equipo de recepción.

El formato de transmisión APT es considerado un sistema de bajo coste debido a la sencillez de los receptores utilizados para la recepción y demodulación de la señal recibida. En este proyecto se han utilizado dos tipos de receptores: un receptor FM convencional y un receptor SDR. A continuación, se procede a evaluar cada uno de los equipos y sus características principales.

### 3.2.1. Receptores convencionales

Los receptores convencionales FM son muy utilizados en la recepción de señales APT, debido a que son instrumentos de bajo coste y ofrecen buenas prestaciones. En las pruebas realizadas en este proyecto se ha utilizado el receptor **Walkie talkie UV3R+ de Baofeng**, ver Figura 3.16. Este receptor es capaz de sintonizar frecuencias en el rango entre 136-174 MHz y 400-470 MHz.

El funcionamiento de este tipo de receptores sigue el diagrama de bloques de la Figura 3.17. Inicialmente, la señal es recibida y amplificada con el fin de aumentar la potencia de la señal de entrada, debido a que las señales vía satélite se reciben con un nivel de potencia muy bajo y,

## CAPÍTULO 3. SISTEMA DE RECEPCIÓN

---



Figura 3.16: Receptor convencional: Walkie talkie baofeng UV3R+ [30].

además, la señal pasa por un filtro paso banda que deja pasar la banda de frecuencias a procesar. A partir del Voltage Controlled Oscillator (VCO), se muestra a su salida una señal eléctrica con frecuencia proporcional a la tensión de la señal que recibe a su entrada. Después de un amplificador de bajo ruido y un segundo filtrado, el mezclador es el encargado de desplazar la banda de frecuencias de trabajo a la frecuencia intermedia deseada. Por último, es necesario un nuevo filtrado de la señal cuyo objetivo es la eliminación de la frecuencia imagen que se produce por el oscilador, debido a que puede causar interferencias en el procesado de la señal [31].

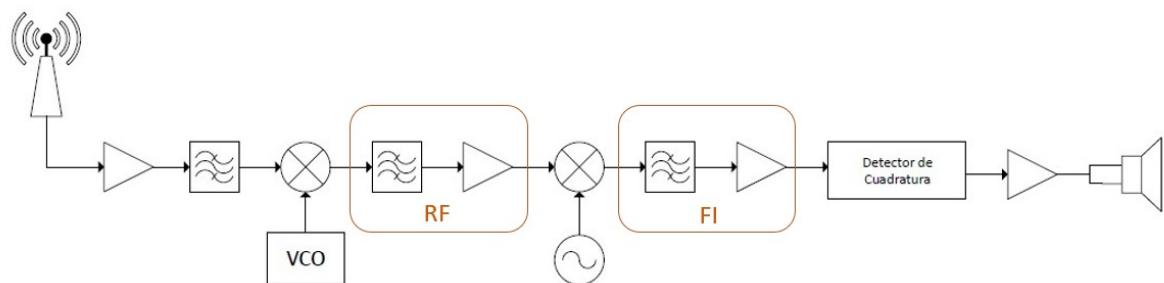


Figura 3.17: Ejemplo del diagrama de bloques del receptor convencional FM.

Finalmente, la señal se procesa en un detector de cuadratura que parte de la señal paso banda localizada en la frecuencia intermedia, y genera la señal equivalente paso bajo que es amplificada

## CAPÍTULO 3. SISTEMA DE RECEPCIÓN

---

por última vez. El último bloque se corresponde a un altavoz, dado que la señal de salida del sistema es un audio. A partir del procesado digital de esta señal audible de salida, se obtiene la imagen APT transmitida por el satélite NOAA. En la Sección 3.3 se analizan los diferentes tipos de *software* gratuitos para la decodificación de la señal.

### 3.2.2. Receptores SDR

El receptor SDR es un sistema de radiocomunicaciones en el que ciertos componentes electrónicos, como amplificadores o filtros, han sido implementados mediante *software* con el fin de proporcionar mayor versatilidad de los equipos de comunicaciones de radio, ya que pueden variar sus componentes fácilmente para adaptarse a los nuevos estándares de comunicaciones. Por otro lado, proporciona una gran cantidad de soluciones para diferentes sistemas de comunicaciones en las que la señal recibida no presenta siempre la misma modulación o frecuencia [32].

Por otro lado, se utilizan diferentes programas para el desarrollo del receptor FM, como *GNU-Radio* u otros softwares gratuitos [33]. Este *software* libre y gratuito es un conjunto de librerías que permiten mediante el uso de bloques de procesamiento de la señal el desarrollo de diferentes sistemas de recepción y transmisión.

El RTL-SDR utilizado en este trabajo es el receptor **Nooelec NESDR Mini 2+ 0.5PPM TCXO**, mostrado en la Figura 3.18. Este receptor dispone de un circuito integrado RTL2832U, que realiza las funciones de un demodulador y, además, de interfaz Universal Serial Bus (USB), y un sintetizador R820T2, capaz de sintonizar frecuencias en un rango entre 500 kHz y 1.7 MHz, con un ancho de banda de 2.4 MHz, por tanto, es suficiente para obtener la señal transmitida por los satélites NOAA.



Figura 3.18: Receptor RTL-SDR: Nooelec NESDR Mini 2+ 0.5PPM TCXO [34].

En la Sección 4.4, se analizan detalladamente el receptor SDR y sus componentes.

### 3.3. Software de decodificación y procesado

A continuación, se presenta el último componente de la estación receptora de este proyecto, el **software de decodificación de la señal**. La señal de salida del receptor SDR, o del receptor convencional FM, es la entrada de los sistemas de decodificación y procesado de la señal. A partir de estos sistemas se obtiene la imagen APT transmitida por los satélites NOAA. Más adelante se analizan varias aplicaciones de decodificación y procesado que permiten la visualización de la imagen y su edición, como mejoras de contraste o color.

#### 3.3.1. WXtoImg

El *software* de decodificación **WXtoImg** permite la visualización de la señal APT en tiempo real, dado que esta aplicación admite la grabación, decodificación y edición de las imágenes recibidas de los satélites meteorológicos [13].

Los sistemas de decodificación habituales procesan la señal a partir de un fichero de audio seleccionado, sin embargo, *WXtoImg* presenta la opción adicional de grabar las señales transmitidas por los satélites meteorológicos. Para ello, se debe disponer de un SDR o un receptor de comunicaciones que cubra la banda de frecuencias entre 137 y 138 MHz, frecuencia de transmisión de los satélites NOAA, además de la antena receptora de la señal.

Después del procesado inicial que realiza esta aplicación, se presenta la imagen APT en blanco y negro con las características bandas de sincronización y telemetría analizadas anteriormente en la Sección 2.2.2, ver Figura 3.19.

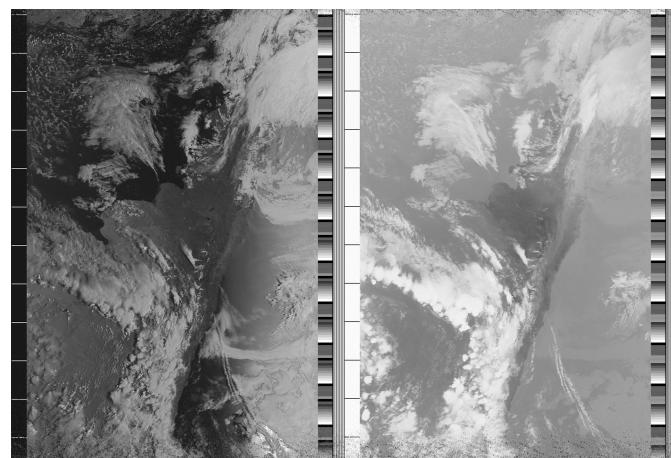
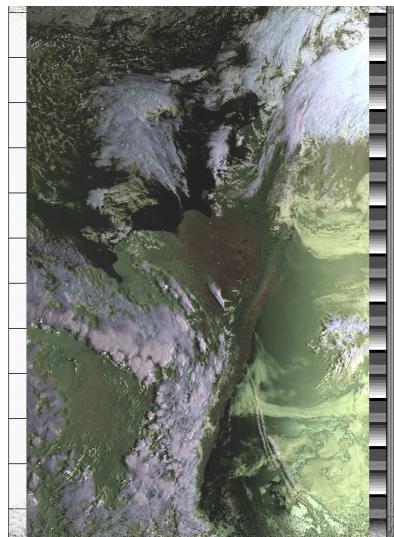
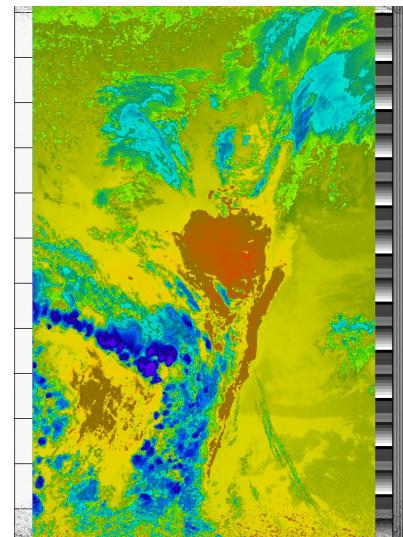


Figura 3.19: Ejemplo de imagen decodificada por la aplicación *WXtoImg*.

Estas imágenes se pueden editar con diferentes herramientas disponibles en la aplicación, como la incorporación del falso color (Figura 3.20 (a)), la edición del contraste de la imagen, el recorte de las bandas de telemetría y sincronización o la superposición de mapas. Además, se ofrece la posibilidad de visualizar sobre la imagen el parámetro de la temperatura, ver Figura 3.20 (b).



(a) Imagen en falso color.



(b) Imagen de la temperatura superficial.

Figura 3.20: Ejemplos de la imagen editada con las herramientas de *WXtoImg*.

Sin embargo, aunque en 2018 se dejó de desarrollar *WXtoImg* se sigue utilizando en páginas *web*, donde se actualizan y muestran las imágenes grabadas y decodificadas. Algunas de estas páginas son, por ejemplo: *Wraase electronic*, que ofrece imágenes del norte de Alemania [35] y *Weather Satellite Images*, dónde se pueden ver imágenes meteorológicas de Washington.

### 3.3.2. NOAA APT decoder

El *software* de la aplicación **NOAA APT decoder** ha sido desarrollado para la decodificación y procesado de las señales APT, con el objetivo de obtener las imágenes meteorológicas transmitidas por los satélites NOAA, ver ejemplo de la Figura 3.21 [36].

*NOAA APT decoder* realiza la decodificación del archivo de entrada con formato *.wav*, ya que a diferencia de *WXtoImg* no realiza un seguimiento del satélite, ni la grabación, en tiempo real, de las imágenes APT. El inicio del desarrollo de esta aplicación surge a partir de la falta de mantenimiento de la aplicación *WXtoImg*, con el objetivo de desarrollar una aplicación para

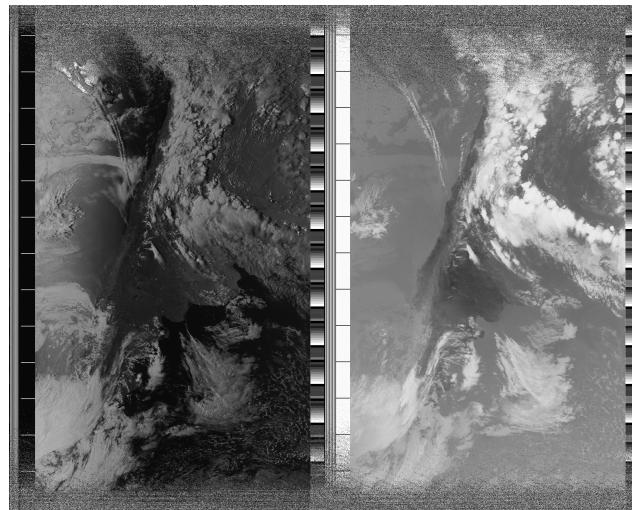


Figura 3.21: Ejemplo de imagen decodificada por la aplicación *NOAA APT decoder*.

*Windows* con una interfaz sencilla y cómoda para el usuario. Las herramientas de procesado y edición de las imágenes son similares a las ya comentadas en la sección anterior, sin embargo, se presentan otros instrumentos como la rotación de la imagen, cuando el satélite ha realizado una pasada ascendente, en vez de descendente y la eliminación de la sincronización de la imagen cuando los ficheros de audio no han sido grabados correctamente. En la Figura 3.22 se muestra la imagen en falso color realizada por la aplicación NOAA APT decoder, en la que se pueden observar las diferentes zonas de la imagen según los colores que representan la vegetación, el agua, las nubes y las zonas áridas (verde, azul, blanco y marrón, respectivamente).

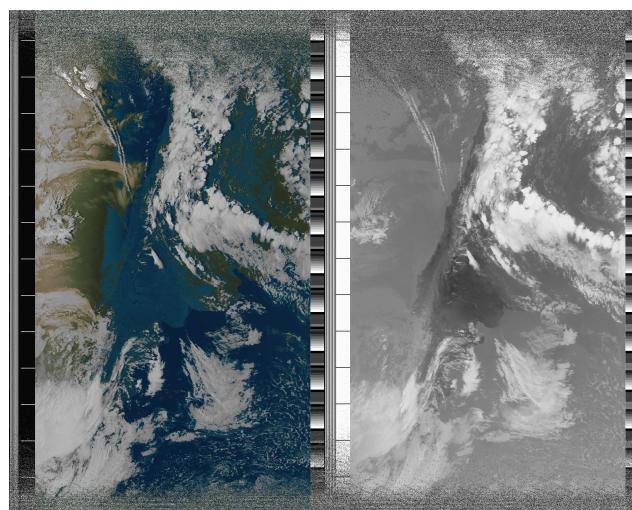


Figura 3.22: Ejemplos de la imagen en falso color de *NOAA APT decoder*.

El software de esta aplicación se encuentra disponible en el repositorio de *Github* [37].

## CAPÍTULO 3. SISTEMA DE RECEPCIÓN

---

La mayor parte del código se ha desarrollado en *Rust* y su instalación está disponible para *GNU / Linux*, *Windows*, *Raspberry Pi 2+*, *OSX* y *Android+Termux*. Por otro lado, se puede utilizar la versión Graphical User Interface (GUI) de la aplicación, pero también está disponible la opción de trabajar sobre la terminal.

### 3.3.3. Otros softwares comerciales

Anteriormente, se han analizado dos aplicaciones para la decodificación de la señal APT transmitidas por satélites meteorológicos. Sin embargo, existe una gran variedad de *software* de decodificación de diferentes compañías con diferentes prestaciones y herramientas para la decodificación y edición de las imágenes obtenidas.

Por ejemplo, **APTDecoder** es un *software* muy utilizado por los usuarios dado que dispone de herramientas muy similares a las ofrecidas por el *software* *WXtoImg*, como el seguimiento y la grabación de la señal APT. *APTDecoder* ofrece la opción de mostrar la temperatura de las nubes que aparecen en la imagen decodificada, aplicando un color azul a las nubes con menor temperatura y un color blanco, cuando disponen de una temperatura superior.

Por otro lado, existen *softwares* que ofrecen otro tipo de herramientas como la posibilidad de la superposición de los mapas sobre la imagen APT, mostrando las fronteras de los países o los ríos que son visibles. Muchas de estas aplicaciones ofrecen además la posibilidad de ajustar el contraste o la reducción de ruido de las imágenes, con el objetivo de proporcionar imágenes más nítidas frente a señales APT grabadas con poca calidad. Sin embargo, acceder a este tipo de prestaciones supone un coste superior y, por tanto, en este trabajo se ha optado por desarrollar un software propio de decodificación para implementar el sistema receptor completo y, con fines docentes, ser capaces de manejar cada paso en la decodificación y procesado de la imagen.

## **Capítulo 4**

# **Diseño e implementación del sistema de recepción y visualización de imágenes en formato APT**

Previamente se han descrito los componentes que son utilizados habitualmente en la elaboración de estaciones receptoras de señales APT transmitidas por los satélites meteorológicos. Sobre la base de este conocimiento y con el objetivo de construir la estación receptora adecuada para este proyecto, se procede a la elección y el análisis de los componentes necesarios para la recepción de la señal transmitida por los satélites NOAA. En este capítulo, se presenta el análisis del balance de enlace de la comunicación vía satélite y se profundiza en la antena escogida en este proyecto. Finalmente, después de introducir la funcionalidad del receptor SDR, se muestra en detalle el *software* desarrollado para la aplicación de decodificación de la señal APT recibida.

### **4.1. Esquema general**

La recepción de la señal APT se ha realizado en el campus de la Universidad Rey Juan Carlos (URJC) de Fuenlabrada, donde se ha colocado la antena construida en este trabajo, ver Sección 4.3. La señal se guía desde la antena hasta el receptor mediante un cable coaxial RG-58 con una impedancia de 50 omhs y una longitud de 2 metros de largo. El receptor de la señal escogido, analizado en la Sección 4.4, se conecta al ordenador portátil en el que se encuentra instalado el *software* de decodificación y procesado de la señal, *NOAAApp*, desarrollado para este trabajo.

Finalmente, se obtiene la imagen APT que ha enviado el satélite NOAA-18.

## 4.2. Balance de enlace

Con el fin de conocer si la antena de este trabajo es capaz de recibir la señal transmitida por el satélite NOAA-18, es necesario evaluar los parámetros que caracterizan y afectan a la señal en el radioenlace. A este análisis se denomina **balance de enlace**. A continuación, se presenta la ecuación (4.1) para el cálculo del balance de enlace y se analizan individualmente los parámetros que la componen [38].

$$P_{Rx} = PIRE_{Tx} - L_{propagación} - L_{polarización} + G_{Rx} - L_{cable_{Rx}} \quad [dBm] \quad (4.1)$$

En primer lugar, la **potencia recibida**,  $P_{Rx}$ , es la potencia recibida en el receptor. Esta potencia se calcula a partir de la potencia transmitida del satélite y de las ganancias y pérdidas que sufre la potencia en su propagación. Para que el enlace satélite-antena receptora sea viable, la  $P_{Rx}$  debe ser superior a la sensibilidad del receptor.

Por otro lado, el término  $PIRE_{Tx}$  hace referencia al término **Potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE)** que es la potencia que radiaría una antena isotrópica teórica para producir la misma potencia que la radiada por la antena transmisora, en su dirección de máxima ganancia. Como se puede observar en (4.2) esta potencia tiene en cuenta la ganancia de la antena transmisora,  $G_{Tx}$ , y las pérdidas producidas por el cable de conexión de la antena y el transmisor,  $L_{cable_{Tx}}$ . La PIRE se mide en decibelio-milivatio, dBm. La señal del satélite NOAA-18 se transmite con una PIRE total de 40 dBm (10 W) [39].

$$PIRE_{Tx} = P_{Tx} + G_{Tx} - L_{cable_{Tx}} \quad [dBm] \quad (4.2)$$

La **ganancia de la antena receptora**,  $G_{Rx}$ , y de la antena de transmisión,  $G_{Tx}$ , se mide en decibelios respecto la ganancia de una antena isotrópica, dBi. En (4.3) se muestra el cálculo de la ganancia de una antena en la dirección definida por sus ángulos  $\theta$  y  $\phi$ . La ganancia de una antena depende de la potencia radiada, en la misma dirección en la que se mide la ganancia, y de la potencia de una antena isotrópica,  $P_t/4\pi$ . En la Sección 4.3 se ha calculado la ganancia máxima

## CAPÍTULO 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RECEPCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES EN FORMATO APT

---

de la antena receptora, obteniéndose en la dirección de máxima directividad un valor de 6 dBi.

$$G(\theta, \phi) = 10 \cdot \log \left( \frac{P(\theta, \phi)}{P_t/4\pi} \right) \quad [dBi] \quad (4.3)$$

Por otro lado, la atenuación de la potencia que se produce entre el cable de conexión y la antena se representa en la ecuación como  $L_{cable_{Tx}}$  y  $L_{cable_{Rx}}$ , y su unidad de medida son los dB. Las pérdidas del cable se calculan a partir de sus características que se definen en el Apéndice C. La atenuación producida por el cable de conexión para una frecuencia de 100 MHz es de 0.21 dB/m. Por tanto, para un cable de 2 m y un enlace cuya frecuencia central es 137.9125 MHz (frecuencia de transmisión del satélite NOAA-18), las pérdidas totales son de 0.58 dB.

El término  $L_{polarización}$  es la atenuación de potencia que se produce por el desacople de la polarización de la antena de transmisión (Tx) y de recepción (Rx) en dB. Como se ha explicado en el capítulo anterior, la polarización de ambas antenas debe ser circular y su giro debe ser a derechas. Debido al posible desacoplo de la polarización y variaciones en el apuntamiento de la antena, se establece un valor de 1 dB en las pérdidas de polarización.

$$L_{polarización} = -20 \cdot \log(\hat{e}_{Tx} \cdot \hat{e}_{Rx}) \quad [dB] \quad (4.4)$$

Y, por último, las **pérdidas por propagación**,  $L_{propagación}$ , es la atenuación que sufre la potencia de la señal en el espacio libre. Estas pérdidas son muy relevantes en la comunicación vía satélite debido a que, a mayor distancia entre el transmisor y el receptor, se produce mayor atenuación de la potencia de la señal trasmisida. El cálculo de las pérdidas por propagación se determina a partir de la frecuencia de diseño del enlace (137.9125 MHz) y la distancia entre el emisor y el receptor, ver ecuación (4.5). Es conocido que el satélite NOAA-18 se encuentra en una órbita LEO polar. La distancia mínima satélite-receptor se puede aproximar a 850 km en el cenit. Por otro lado, siendo el ángulo de la zona visible del satélite  $75.35^\circ$ , la distancia máxima entre las antenas de transmisión y recepción puede ser de 3360.8 km. En la Tabla 4.1 se presentan las pérdidas de propagación según la distancia entre el transmisor y el receptor.

$$L_{propagación} = 32.4 + 20\log(f[MHz]) + 20\log(d[km]) \quad [dB] \quad (4.5)$$

Por último, el valor máximo de la sensibilidad del receptor convencional es de 0.2uV (SINAD<sup>1</sup> de 12 dB). Para una frecuencia de 137 MHz se puede considerar que la sensibilidad del receptor

---

<sup>1</sup>SINAD: define el valor relación señal-ruido y distorsión. Sus unidades son los dB.

**CAPÍTULO 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RECEPCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES EN FORMATO APT**

---

<b>Distancia entre antenas [km]</b>		<b>Pérdidas de propagación [dB]</b>
Mínimo	850	133.78
Máximo	3360.8	145.72

Tabla 4.1: Pérdidas de propagación del enlace de comunicaciones según la distancia entre las antenas.

convencional es de -130 dBm. Sin embargo, no se dispone del valor de la sensibilidad del receptor SDR, dado que varía según el entorno de trabajo, la aplicación utilizada y otros factores. Por tanto, a continuación se presentan diferentes valores de sensibilidad habituales, para verificar que el enlace es viable con la ganancia de la antena diseñada, ver ecuación (4.6) (particularización de (4.1)).

$$P_{Rx,min} = S_{Rx,min} = 40 - 145.72 - 1 + G_{Rx,min} - 0.58 \quad (4.6)$$

En la Tabla 4.2 se presentan los resultados obtenidos a partir de diferentes valores de sensibilidad.

$S_{Rx,min}$ [dBm]	$G_{Rx,min}$ [dBi]
-130	-22.7
-120	-12.7
-110	-2.7
-108	-0.7
-106	1.3
-104	3.3
-102	5.3
-100	7.3

Tabla 4.2: Ganancia necesaria de la antena receptora según el valor de sensibilidad del receptor.

A partir de la tabla anterior, se puede observar que una sensibilidad alta del receptor (menor nivel de potencia en dBm) implica una ganancia de la antena receptora baja, dado que el receptor es capaz de detectar señales de menor potencia. La antena construida en este proyecto presenta una ganancia máxima de 6 dBi, ver Sección 4.3. Por tanto, para conseguir un enlace de

comunicaciones viable, la sensibilidad el receptor debe ser como mínimo de -101.3 dBm. Si se considera la sensibilidad del receptor convencional (-130 dBm) como la sensibilidad del receptor SDR, el balance de enlace es viable.

### 4.3. Elección y construcción de la antena

En la Sección 3.1 se han analizado tres tipos de antenas habituales en la recepción de la señal APT. En el presente proyecto se ha escogido la antena QFH debido a que posee un diagrama de radiación omnidireccional en el semi-espacio superior, además de una polarización RHCP. Por otro lado, cabe destacar la facilidad de construcción de sus componentes y, además, puesto que no dispone de un diagrama de radiación direccional, no es necesario la implementación de un sistema de seguimiento como los analizados en la Sección 3.1.4. Por otro lado, la antena Yagi-Uda ha sido descartada debido a su diagrama direccional y la necesidad de implementar una *Cross Yagi* para la obtención de la polarización circular necesaria en la recepción de la señal en formato APT. Por último, aunque las características de la antena DC eran similares a la antena QFH, no se ha optado por esta antena dado que su diagrama de radiación presenta un nulo en el cenit y proporcionaría pérdidas en dicha dirección en la recepción de la señal.

A continuación, se presentan los pasos que se han seguido en la construcción de la antena QFH implementada en este proyecto, desde la modelización de los parámetros característicos de la antena hasta el montaje de los componentes de la misma.

#### 4.3.1. Parametrización de la antena QFH

La antena QFH está formada por dos espiras cuadradas que han sido sometidas a una torsión. En esta sección, se pretende analizar las características de la antena con el fin de elegir los valores óptimos de los parámetros que caracterizan las espiras que constituyen la antena. El satélite NOAA-18 transmite en la frecuencia 137.9125 MHz, sin embargo, en las simulaciones realizadas de la antena se ha establecido un valor de 137.5 MHz como frecuencia central para recibir la señal de los satélites de la constelación NOAA.

En primer lugar, se deben establecer las magnitudes iniciales de las espiras para crear la simulación en el software de *Feko*. En consecuencia, se ha usado la herramienta *online* [40] para la obtención de los parámetros iniciales de la antena. Los parámetros de entrada necesarios son

la **frecuencia del enlace**; la **cantidad de vueltas** que define la torsión aplicada a las espiras; el **radio de doblado** del cable coaxial a la salida del mástil, ya que es difícil mantener un giro de  $90^\circ$ ; el **diámetro del conductor**, o del coaxial en este caso, y la **relación diámetro/altura**. Acto seguido, en la Tabla 4.3 se muestran los valores necesarios que se deben introducir al inicio del cálculo.

Frecuencia de diseño	137.5 MHz
Cantidad de vueltas	0.5
Radio de doblado	10 mm
Diámetro del conductor	5 mm
Relación diámetro/altura	0.586

Tabla 4.3: Parámetros y valores de entrada a la herramienta *online*.

En la siguiente sección se realiza una distinción entre las dos espiras que forman la antena, con el fin de definir los parámetros característicos de cada espira. Por un lado, se define la espira o *loop* larga que es la espira de mayor longitud y, por otro lado, la espira o *loop* corta que, como su nombre indica, es la espira de menor longitud. En la Tabla 4.4 se muestran los parámetros de salida para la construcción inicial de la antena en el simulador, obtenidos a partir de la herramienta *online*. En esta tabla se definen el parámetro de **longitud** como el largo total de la espira y, por otro lado, la **altura** hace referencia a la distancia entre el cuadro inferior y superior que mantiene la posición de la espira. Finalmente, el **diámetro** inferior (o superior) es el diámetro del cilindro que crea el helicoide circular de las espiras.

	<b>Loop largo</b>	<b>Loop corto</b>
Longitud [mm]	2395.2	2276.1
Altura [mm]	622.3	591.7
Diámetro superior [mm]	334.6	316.7
Diámetro inferior [mm]	364.6	346.7

Tabla 4.4: Parámetros y valores de salida de la herramienta *online*.

Después de introducir los valores de salida como los parámetros iniciales que caracterizan la antena en la simulación realizada mediante *Feko*, se han obtenido los valores óptimos para

mejorar las características de la antena en la recepción de la señal APT. Los valores optimizados, mostrados en la Tabla 4.5, se han utilizado en la nueva simulación de la antena y los empleados para la construcción de la antena de este proyecto. En este caso, se han simplificado los parámetros necesarios para la creación del helicoide circular que da forma a las espiras que constituyen la antena QFH. Producto de esta simplificación, se observa un único diámetro, eliminando la distinción de diámetro inferior y superior presente en la Tabla 4.4.

	<b>Loop largo</b>	<b>Loop corto</b>
Altura [mm]	603	591
Diámetro [mm]	349.5	353.86

Tabla 4.5: Valores optimizados de los parámetros que caracterizan la antena.

A continuación, se presenta en la Figura 4.1 la antena QFH obtenida con los nuevos valores.

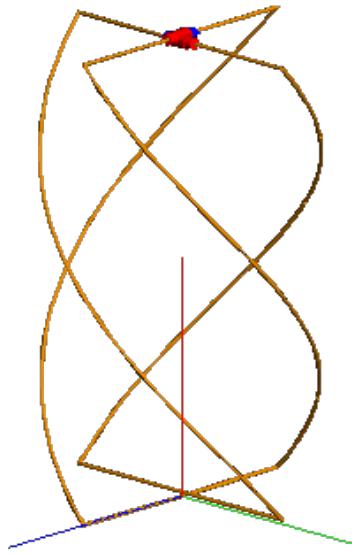


Figura 4.1: Antena QFH con los parámetros optimizados.

Después de haber establecido los valores óptimos que caracterizan la antena, se presentan los parámetros básicos de radiación de la simulación realizada mediante la aplicación *Feko*. En la Figura 4.2 se muestran las características de la ganancia de la antena QFH en la frecuencia 137.5 MHz. La Figura 4.2 (c) refleja el ancho del haz principal a -3dB, el cual define el ángulo que forman los puntos del haz principal donde la potencia disminuye a la mitad. Y, por último, la Figura 4.2 (d) muestra el ancho del haz principal entre nulos, que define el ángulo del haz

principal de radiación de la antena.

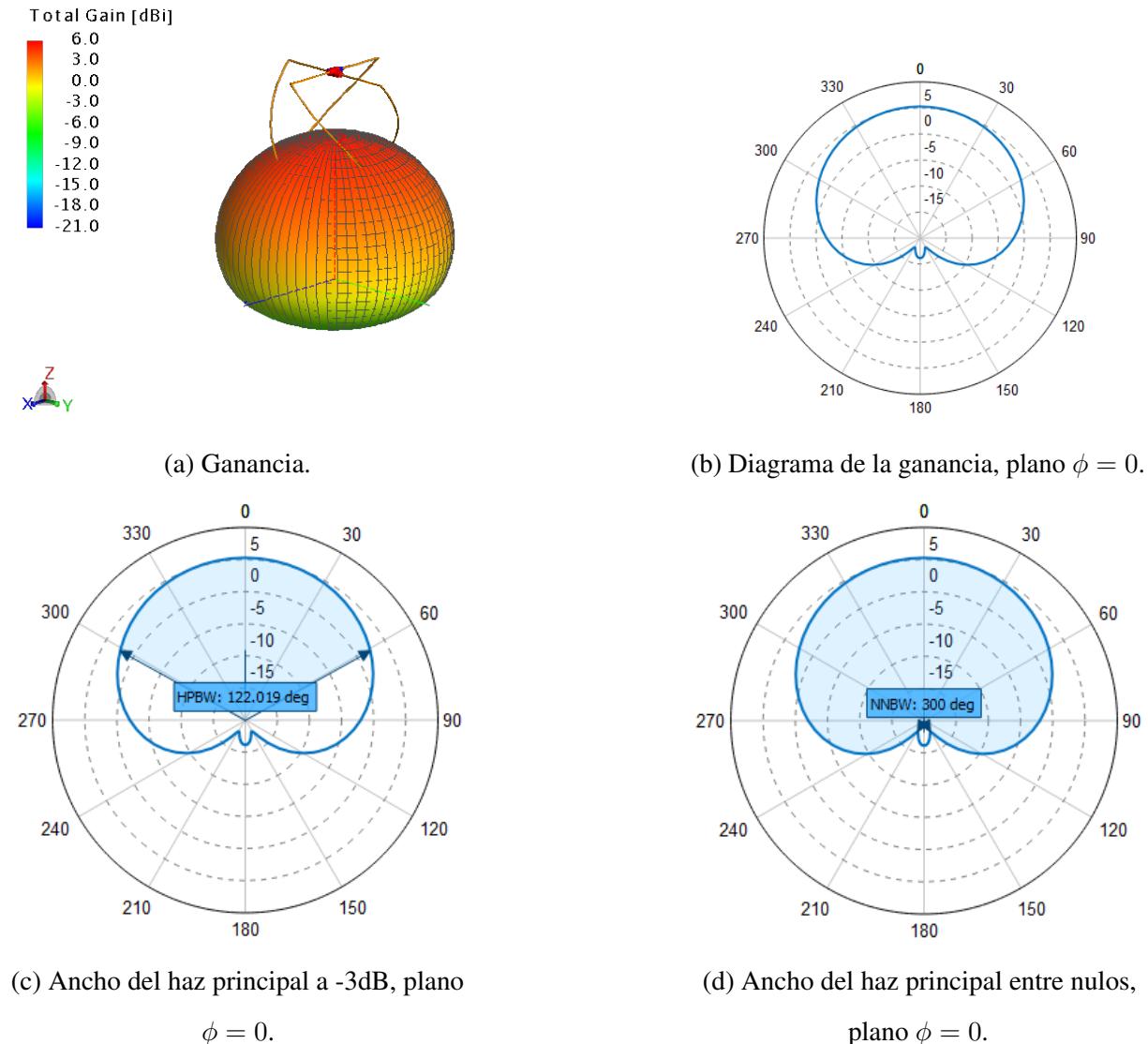


Figura 4.2: Ganancia de la antena QFH [dBi].

Con el fin de representar la polarización de la antena simulada, se ilustra en la Figura 4.3 el valor de la relación axial obtenido. En ella se puede observar cómo se ha obtenido una polarización circular en el semi-espacio superior de la antena, ya que la relación axial es cercana a 0 dB.

Finalmente, no solo es necesario el análisis del diagrama de radiación y la relación axial de la antena simulada, sino que es imprescindible simular el parámetro  $S_{11}$  que proporciona la información sobre la adaptación de la antena. Este parámetro, también conocido como el **coeficiente de reflexión del puerto de entrada**, hace referencia a la cantidad de potencia que se refleja respecto a la cantidad de potencia que se está suministrando en el puerto. En la simulación,

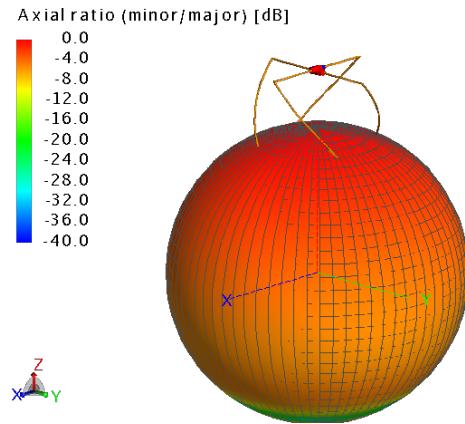


Figura 4.3: Relación axial normalizada de la antena QFH [dB].

se han alimentado las dos espiras en la parte superior de la antena con un desfase de  $90^\circ$ . El coeficiente de reflexión  $\Gamma$  se calcula mediante la ecuación (4.7), donde el parámetro  $V_1^-$  es la tensión reflejada, mientras que  $V_1^+$  es la tensión incidente del puerto 1.

$$\Gamma = \frac{V_1^-}{V_1^+} \quad (4.7)$$

En la Figura 4.4 se observa el valor del coeficiente de reflexión en ambos puertos. Para una correcta adaptación de la antena, el coeficiente de reflexión debe ser menor que  $-10$  dB y, se observa que el valor de dicho parámetro de la antena en la simulación es de  $-15.67$  dB en la frecuencia de diseño. Por tanto, se confirma la correcta adaptación de la antena QFH.

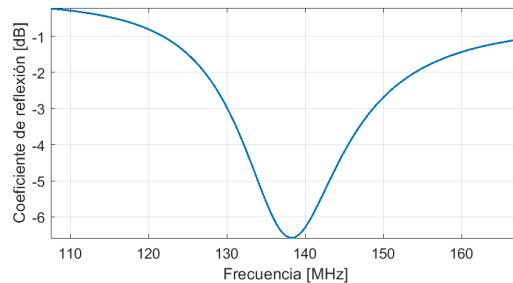


Figura 4.4: Coeficiente de reflexión de la antena QFH.

### 4.3.2. Construcción de la antena QFH

En esta sección se analizan los detalles necesarios para la construcción de la antena QFH simulada en la sección anterior, con el fin de recibir la señal APT transmitida por los satélites

meteorológicos NOAA.

En primer lugar, las espiras, que son el elemento radiante de la antena, se han implementado mediante un cable coaxial RG-58. Las espiras de pueden construir a partir de varas de cobre o aluminio, sin embargo, en este trabajo se ha elegido el cable coaxial debido a que aporta flexibilidad en los giros que realizan las espiras. Para la elaboración de las espiras se han utilizado 2.50 m de cable coaxial para cada loop, con una impedancia de 50 Ohms y un diámetro de 5 mm.

En segundo lugar, la construcción de la estructura de la antena se basa en dos componentes: el mástil, que ofrece el soporte principal de la antena y mantiene la posición de los componentes, y los tubos secundarios, que guían el cable coaxial y le dan la forma de helicoide circular. El mástil lo forma un tubo de PVC de 40 mm de diámetro y 170 cm de longitud. Por otro lado, los tubos secundarios se han diseñado de dos maneras diferentes con el fin de escoger la opción más adecuada para la implementación de la antena.

En un primer momento, los tubos secundarios se diseñaron mediante la aplicación AutoCAD [41] para después obtenerlos a partir de una impresora 3D. Ha sido necesario diferenciar los tubos que introducen el cable coaxial en el interior del mástil, que se sitúan en la parte inferior y superior y, los tubos intermedios cuya función es mantener el giro que realizan las espiras desde la parte inferior hasta la parte superior de la estructura. Estos tubos, como su nombre indica, se localizan en una posición intermedia de la estructura y tienen una perforación en el extremo visible, con un diámetro de 7 mm, para el paso del cable en la torsión.

Los tubos secundarios representados en la Figura 4.5 están formados por una parte que recibe el nombre de *extensión*, que se encaja en la pieza central para la sujeción del tubo en el mástil, en consecuencia, la otra parte del tubo queda visible. Por otro lado, se distinguen dos tubos para el loop largo y corto que varían en su longitud para adaptarse a las medidas de la antena obtenidas en la sección anterior, ver Tabla 4.5. Los tubos se han realizado siguiendo las medidas descritas en la Tabla 4.6.

Por último, se ha diseñado la pieza central presente en la parte superior, inferior e intermedia de la estructura. Esta pieza es la encargada de la unión de los tubos secundarios al mástil. Los tubos secundarios se introducen en la pieza principal gracias a la *extensión* que presentan. En la Figura 4.6 se muestra la pieza central que se ha implementado.

Finalmente, para la construcción completa de la estructura de la antena son necesarios:



(a) Tubo superior/inferior.

(b) Tubo intermedio.

Figura 4.5: Tubos secundarios de la estructura de la antena QFH.

Tubo	Longitud	Diámetro externo	Diámetro interior
Tubo inferior/superior loop largo	111.9	14	8
Tubo inferior/superior loop corto	109.7	14	8
Tubo intermedio	120	14	8
Extensión	40.82	10	8

Tabla 4.6: Medidas de los tubos secundarios en milímetros.

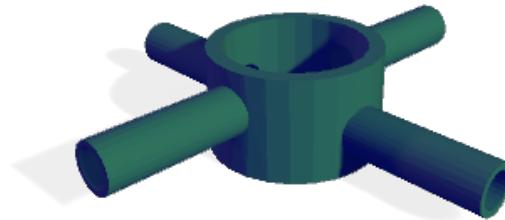


Figura 4.6: Pieza central de la estructura de la antena QFH.

- 2 tubos inferiores del loop corto.
- 2 tubos inferiores del loop largo.
- 2 tubos superiores del loop corto.
- 2 tubos superiores del loop largo.
- 4 tubos intermedios.
- 3 piezas centrales.

## CAPÍTULO 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RECEPCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES EN FORMATO APT

---

Después del montaje completo de la estructura y la realización de algunas pruebas, se optó por cambiar los tubos impresos por tubos de PVC. Esta decisión se debe a que el PVC es un material más resistente y ofrece mayor rigidez, manteniendo la posición correcta del cable coaxial en los giros de las espiras. Por tanto, se han realizado tubos secundarios de PVC haciendo las mismas distinciones que en el apartado anterior. Finalmente, las medidas se presentan en la Tabla 4.7. Estos tubos secundarios no disponen de extensión ya que se introducen directamente en el mástil principal y no en la pieza central, como se había realizado anteriormente.

	Longitud	Diámetro
Tubo inferior/superior loop largo	154.75	16
Tubo inferior/superior loop corto	156.93	16
Tubo intermedio	165	16

Tabla 4.7: Medidas finales de los tubos secundarios en milímetros.

En tercer lugar, se deben hacer los agujeros necesarios en el mástil principal para poder introducir los tubos secundarios y el cable de alimentación. Los tubos secundarios se deben colocar cada  $45^{\circ}$  en la circunferencia del mástil principal y, por otro lado, las distancias a la que se deben realizar los agujeros para introducir los tubos se presentan en la Figura 4.7(a).

Por otro lado, el cable de alimentación se introduce por el agujero creado en el mástil, debajo del cuadro inferior formado por los tubos secundarios, para recorrerlo por el interior hasta la parte superior de la estructura. Con el fin de eliminar las corrientes externas del cable de alimentación, se implementa un ***Choke balun***, que consiste en bobinar el cable de alimentación un total de 4 vueltas alrededor del mástil y lo más cercano posible a la conexión de la alimentación con las espiras.

El *choke balun* reduce e impide el paso de las corrientes externas en el cable coaxial de la alimentación. Estas corrientes externas se producen cuando la alimentación de la antena receptora no es simétrica. Esta situación es causada por la alimentación de la antena a partir del cable coaxial, ya que uno de los conductores se conecta a la malla, como se ve en la Figura 4.9. La descompensación de potencial entre los dos conductores de la antena produce una corriente en el cable, que recibe el nombre de corriente externa [42]. Es necesario reducir estas corrientes porque pueden producir asimetrías en el diagrama de radiación y/o volver al equipo de recepción.

De este modo, la inductancia que se crea con el bobinado no permite la interferencia de corrientes externas. En consecuencia, a este bobinado en la parte superior de la estructura, es necesario realizar dos agujeros para la extracción e introducción del cable de alimentación en la parte donde se efectúa el bobinado, ver Figura 4.7 (b).

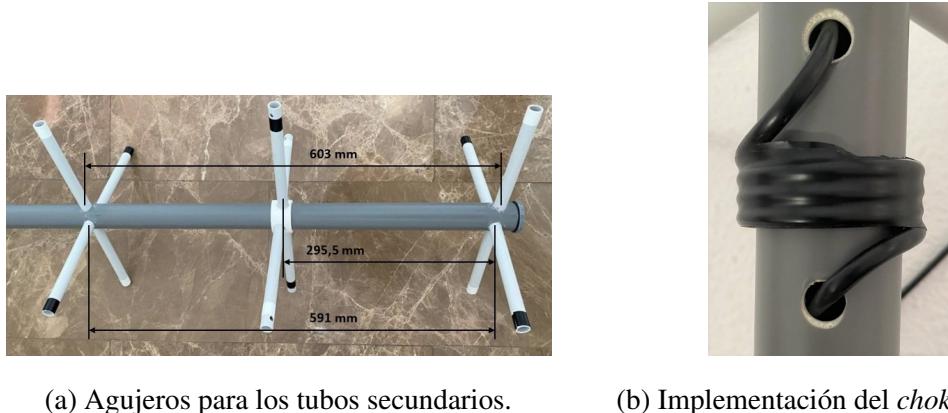


Figura 4.7: Posiciones de los agujeros para la introducción de los tubos secundarios y el cable de alimentación.

Finalmente, en la Figura 4.8 se puede observar la estructura final de la antena QFH, formada por el mástil principal y los tres cuadros, formados por los tubos secundarios. Con el fin de distinguir los tubos secundarios del loop largo y el loop corto, se han señalizado con un color blanco y negro, respectivamente.

Después de haber construido la estructura de la antena QFH, se procede a la introducción del cable coaxial para implementar las espiras. A continuación, se presenta el esquema para establecer las conexiones entre los extremos del cable coaxial de cada espira y el cable de alimentación, ver Figura 4.9. En primer lugar, es necesario soldar la malla y el vivo de cada extremo del cable coaxial de las espiras. Este sistema facilita la posterior conexión con la alimentación. Mediante el uso de clemas, se debe conectar la malla de la alimentación con los extremos C y D de las espiras, mientras que el vivo de la alimentación es conectado a los extremos A y B de las espiras. Cabe destacar la importancia de la configuración de la conexión, dado que estas uniones ofrecen un diagrama de radiación omnidireccional en el semi-espacio superior y una polarización RHCP.

Por último, en la Figura 4.10 se muestra es aspecto final de la antena QFH con las espiras colocadas en su posición.

CAPÍTULO 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RECEPCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES EN FORMATO APT

---

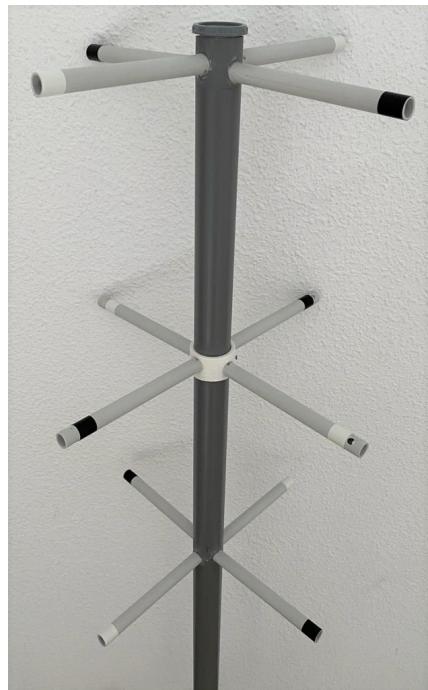
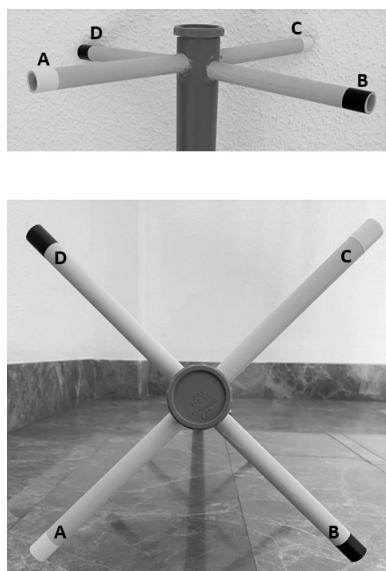


Figura 4.8: Estructura final de la antena QFH.



(a) Extremos de las conexiones.



(b) Unión mediante las clemas.

Figura 4.9: Implementación de las conexiones de las espiras y la alimentación.

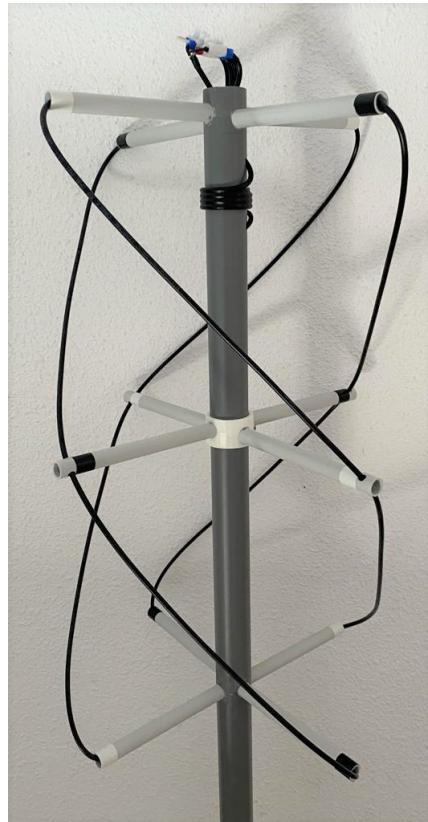


Figura 4.10: Estado final de la antena QFH.

#### 4.3.3. Parámetros de la antena QFH

Antes de realizar pruebas de recepción de la señal APT con la antena QFH detallada en la sección anterior, se han realizado pruebas para la caracterización y adaptación de los parámetros de ganancia y polarización de la antena. Estas pruebas se han llevado a cabo enfrentando la antena QFH construida y una antena Log-periódica con radomo<sup>2</sup>, que se ha escogido debido a que presenta un diagrama directivo con poca presencia de lóbulos secundarios y es adecuada para la medición con precisión de la directividad de la antena QFH. El instrumento utilizado para obtener los valores del coeficiente de transmisión directa,  $S_{21}$ , de la antena recibe el nombre de **analizador de redes** portátil. Por tanto, a partir de los valores del parámetro  $S_{21}$  en diferentes ángulos y a una frecuencia de 137.5 MHz se puede obtener el diagrama de radiación de la antena QFH.

Con el fin de medir la ganancia de la antena, se procede a su orientación variando el ángulo de elevación, sin embargo, como la posición de la antena es paralela al suelo, dado que su

---

<sup>2</sup>Radomo: protección de algunas antenas contra la intemperie u otros agentes.[43]

## CAPÍTULO 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RECEPCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES EN FORMATO APT

---

diagrama de radiación es máximo en la parte superior, el ángulo de elevación en las pruebas es un ángulo horizontal. En las pruebas, se ha obtenido el coeficiente de transmisión directa,  $S_{21}$ , que mide la potencia recibida en el puerto 2, antena Log-periódica, en comparación con la potencia transmitida por el puerto 1, antena QFH. Las mediciones se han realizado entre los ángulos  $90^\circ$  y  $-90^\circ$  con un paso de  $10^\circ$  y se ha comparado el valor de la directividad de la antena QFH construida, en color verde, y el diagrama de radiación completo de la antena simulada en *Feko*, en color negro, ver Figura 4.12 (a). Como se puede ver en esta representación, el diagrama de radiación de la antena construida es similar al de la antena simulada en *Feko*, por tanto, presenta un diagrama de radiación omnidireccional en el semi-espacio superior para recibir la señal APT.

Por otro lado, se ha caracterizado la relación axial de la antena QFH. En este caso, la parte superior de la antena construida se enfrenta hacia la antena Log-periódica, sin embargo, en esta ocasión el eje de rotación es el eje que forma el mástil de la antena. Las mediciones se han realizado con el fin de caracterizar los  $360^\circ$  del diagrama con un paso entre mediciones de  $45^\circ$ . Finalmente, se representa la comparación de la relación axial de la antena QFH construida, de color verde, y la antena simulada en *Feko*, en color negro, ver Figura 4.12 (b). En la simulación se observa una perfecta circunferencia en 0 dB (1 en unidades naturales), que refleja la polarización circular de la antena, mientras que los valores de la relación axial de la antena del proyecto representan una polarización circular no ideal, ya que se pueden observar valores inferiores a 0 dB.

Como se observa en la Figura 4.11, las pruebas se han realizado en un laboratorio del Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la universidad URJC. En la imagen se pueden ver los tres instrumentos utilizados en las pruebas: la antena QFH situada a la izquierda en la imagen, enfrente a la antena Log-periódica, localizada a la derecha y, por último, el analizador de redes, con el que se han obtenido las medidas del coeficiente de transmisión directa, colocado en la esquina inferior izquierda. Debido a que la toma de medidas se ha realizado en un entorno no anecoico<sup>3</sup>, son esperables variaciones respecto a los valores obtenidos en las simulaciones. Por otro lado, el posicionamiento también ha sufrido variaciones dado que se ha realizado manualmente. Pese a los comentarios anteriores, los resultados de medida muestran buena concordancia con las simulaciones.

Finalmente, mediante el analizador de redes se han realizado las medidas del coeficiente de

---

<sup>3</sup>Anecoico: capaz de absorber las ondas sonoras o electromagnéticas sin reflejarlas[44]



Figura 4.11: Pruebas de radiación en el laboratorio.

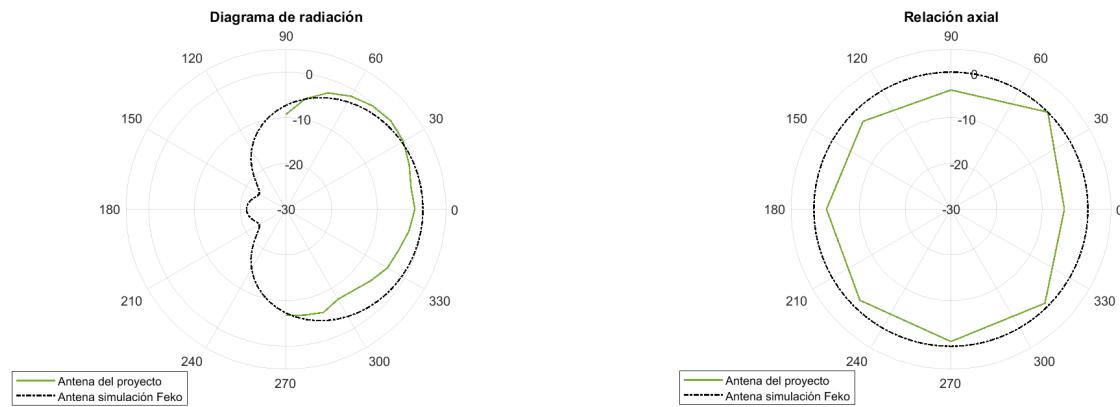


Figura 4.12: Comparación de los parámetros de radiación de la antena QFH simulada en *Feko* y la antena QFH real construida en el proyecto.

reflexión de puerto de entrada,  $S_{11}$ . El objetivo de estas mediciones es comprobar la adaptación de la antena en la banda de frecuencias de recepción, para ello el valor mínimo del coeficiente de reflexión de la antena QFH, construida en el proyecto debería estar próximo a la frecuencia de 137.5 MHz. La primera medición del parámetro  $S_{11}$  de la antena se muestra en la Figura 4.13. Como se puede observar, el coeficiente alcanza el mínimo en una frecuencia inferior a la deseada. Además, se detectó que la adaptación de la antena era demasiado sensible al entorno y, por tanto, seguían circulando corrientes externas por el mástil. Por ello, se aumentó a 8 el número de giros del *Choke balun* para disminuir las corrientes externas y, se ajustó el cable coaxial que formaba las espiras de la antena. Después de estas mejoras, en la Figura 4.14 se observa como la

segunda medición del coeficiente de reflexión alcanza su mínimo en una frecuencia próxima a la frecuencia central. En el plano auxiliar de esta figura, se encuentra sombreado el ancho de banda de recepción (banda de 137 MHz). Además, se observa que para la frecuencia de 137 MHz se alcanza un valor de -12.06 dB, siendo este valor obtenido mejor que el de la primera medición. Cabe destacar que en la simulación del coeficiente de reflexión realizada en *Feko* se alcanzaba un valor muy similar en dicha banda, ver Figura 4.4.



Figura 4.13: Primera medición del coeficiente de reflexión de la antena QFH.

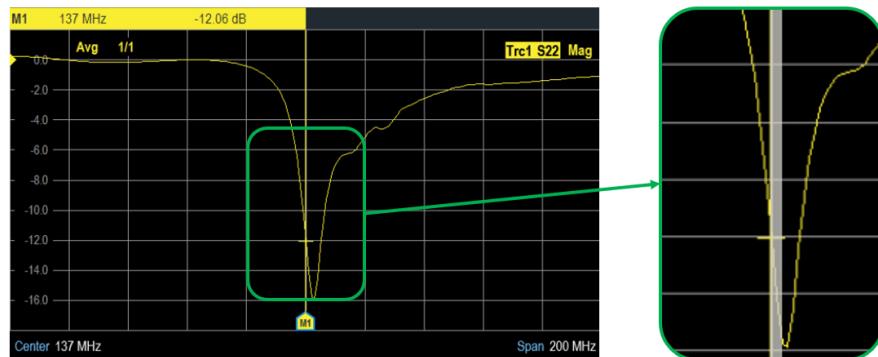


Figura 4.14: Segunda medición del coeficiente de reflexión de la antena QFH.

## 4.4. Equipo de recepción y demodulación

En este proyecto se han analizado y utilizado dos equipos diferentes de recepción de la señal APT. En primer lugar, se ha empleado un receptor convencional FM, analizado con más detalle en la Sección 3.2.1. Este tipo de receptores es muy utilizado debido a su bajo coste y sus buenas prestaciones. En segundo lugar, se ha hecho uso del receptor SDR, que

## CAPÍTULO 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RECEPCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES EN FORMATO APT

---

proporciona mayores ventajas que los receptores convencionales. El sistema SDR proporciona mayor versatilidad debido a que se pueden variar los componentes de radiocomunicaciones que lo integran, ofreciendo diferentes soluciones para los estándares de comunicaciones.

El receptor convencional FM se ha empleado como sistema de apoyo en las recepciones. Por tanto, esta sección centra el análisis en el receptor SDR, *Nooelec NESDR Mini 2+ 0.5PPM TCXO*, ver Figura 3.18. Este receptor SDR recibe en una franja de frecuencias desde 25 MHz hasta los 1750 MHz que, como se ve a continuación, es apta para recibir la señal de los satélites NOAA.

Con el objeto de establecer los parámetros iniciales del receptor se deben conocer las características de la señal APT transmitida. Los satélites NOAA transmiten en las frecuencias entre 137 y 138 MHz, por tanto, para el satélite NOAA-18 la frecuencia de trabajo en este caso se sitúa en los 137.9125 MHz. Por otro lado, es necesario establecer el ancho de banda de la señal en banda base. En la Sección 2.2.3 se ha calculado que 50 kHz es el ancho de banda necesario para la recepción de la señal APT en recepción.

Después de demodular la señal en FM, se obtiene la señal modulada únicamente en AM, a la que se le realiza un filtrado paso bajo cuya frecuencia de corte es el ancho de banda de la señal, con el fin de obtener solo la señal deseada.

Por último, la señal de audio se almacena en un fichero en formato *wav*. Cabe destacar que para la obtención de la imagen APT es necesario demodular este audio en AM, a partir de un detector de envolvente que devuelve la fase de la señal y, disminuir la tasa de muestreo de la señal a una frecuencia de muestreo de 11025 Hz. No obstante, estos dos procesos se realizan en la aplicación NOAAApp (ver Secciones 4.5.1 y 4.5.2).

## 4.5. Software de recepción y procesado: NOAAApp

La radiación captada por el sensor AVHRR (ver Sección 2.2.1) a bordo del satélite meteorológico, es la información enviada a los equipos de recepción terrestres. La señal transmitida se encuentra en el formato analógico APT, cuyos datos están organizados en palabras, las cuales toman el valor de tensión según la escala de grises que representan (siendo el valor de mayor tensión el color blanco y la tensión mínima el color negro), ver Sección 2.2.2.

En primer lugar, es necesario realizar un *remuestreo* la señal de audio de entrada. Este proceso

se realiza con el fin de obtener el audio con la tasa de muestreo correcta para el segundo paso. Después, es necesario aplicar un proceso de demodulación de la señal para extraer la información que caracterizan la imagen. Finalmente, se describen las opciones de procesado de la imagen como: la sincronización, la aplicación del falso color, la reducción del ruido o el aumento del contraste. A continuación, se presenta un análisis de los métodos realizados.

#### 4.5.1. Remuestreo de la señal

El primer paso realizado es *remuestreo* de la señal recibida por la estación receptora. La frecuencia o tasa de muestreo,  $F_s$ , es el número de muestras que se toman por unidad de tiempo. Este parámetro caracteriza la señal recibida y se mide en Hz.

Las señales APT se crean a partir de una frecuencia de muestreo igual a 11025 Hz. En la recepción de la señal, se puede obtener un audio con una frecuencia de muestreo superior a la aceptada, por tanto, es necesario realizar un *remuestreo* de las muestras [45]. En primer lugar, el *remuestreo* realiza un proceso de interpolación en el que se obtiene un nuevo conjunto de puntos de la señal recibida a partir de los ya conocidos. Y, en segundo lugar, se aplica un diezmado, cuyo objetivo es conservar las muestras necesarias para obtener la tasa de muestro seleccionada.

Para los métodos de interpolación y diezmado es necesario conocer la tasa de ambos métodos,  $L$  y  $M$ , respectivamente. Para ello, se realiza el cociente entre la frecuencia de muestreo que se quiere obtener y la frecuencia de muestreo de la señal, ver ecuación (4.8). Ambos factores deben ser enteros.

$$\frac{L}{M} = \frac{F_{s\text{ inicial}}}{F_{s\text{ final}}} \quad (4.8)$$

Por otro lado, se realiza un filtrado de la señal a partir de un Filtro Paso Bajo (FPB) utilizando una ventana de *Kaiser*. Este tipo de filtrado permite establecer el ancho de banda del filtro, la ondulación, o *ripple*, de la banda de paso y la ganancia del filtrado. Por tanto, este filtrado se realiza con el objetivo de reducir el ruido de la señal recibida.

#### 4.5.2. Demodulación de la señal

El primer paso en el proceso de demodulación de la señal de audio recibida es extraer la información necesaria para su caracterización. Esta información está compuesta por la longitud

en tiempo de la señal y la frecuencia de muestreo. La Figura 4.15 es la representación en tiempo de un fragmento de una posible señal de entrada al sistema. El eje horizontal representa el tiempo en segundos y el eje vertical es la amplitud de la señal.

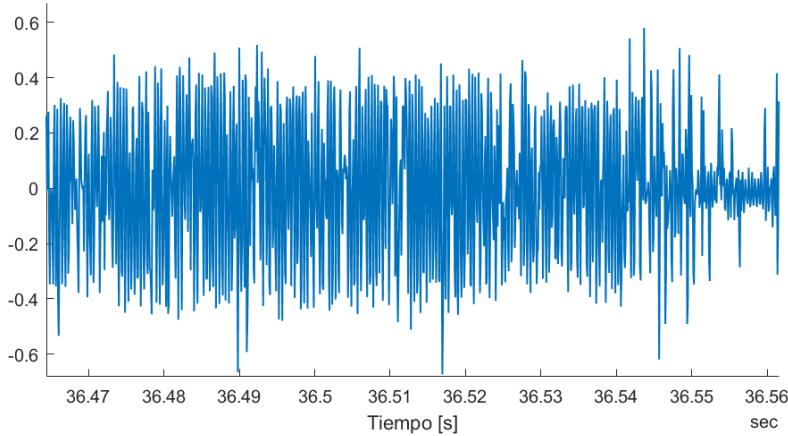


Figura 4.15: Ejemplo de un fragmento de una señal de audio recibida de los satélites NOAA.

Como se ha mostrado al comienzo de la sección, se ha realizado un cambio en la frecuencia de muestreo de la señal, con el objetivo de obtener una tasa de muestreo de 11025 Hz.

En segundo lugar, dado que se ha obtenido una señal modulada en AM, se procede a demodular la señal mediante un detector de envolvente, que se puede realizar mediante la transformada de Hilbert [46]. La parte real de la señal analítica, resultado de esta transformación, se corresponde con los datos de la señal. La ecuación (4.9) se corresponde con la transformada de Hilbert de una señal real.

$$\hat{s}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{\tau - \tau_0} d\tau \quad (4.9)$$

Una vez obtenida la transformada de Hilbert de la señal de entrada, se puede calcular la señal analítica  $s_a(t)$  según la siguiente ecuación:

$$s_a(t) = s(t) + \mathbf{i}\hat{s}(t) \quad (4.10)$$

Finalmente, se obtiene la envolvente de la señal, que corresponde a los datos que dan lugar a la imagen APT. En la Figura 4.16 se puede observar la señal de entrada al sistema de color azul y la envolvente de la señal en color naranja.

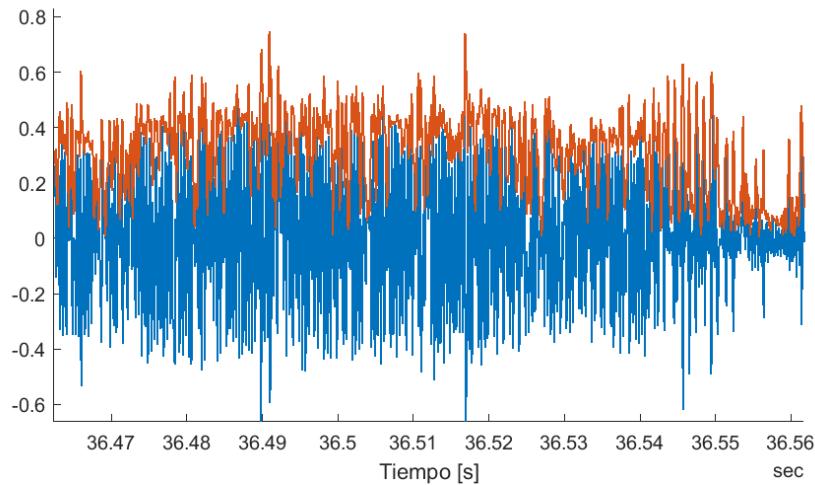


Figura 4.16: Ejemplo de la envolvente de la señal.

#### 4.5.3. Reorganización de las muestras

Después de la demodulación de la señal APT, se dispone de un conjunto de datos organizados en un vector. Por tanto, las líneas de la imagen están dispuestas de manera consecutiva y, es necesario la reorganización de los datos para obtener una matriz con las dimensiones de la imagen APT.

En primer lugar, se obtiene la anchura, o *width*, de la matriz de la muestra de audio. Este valor hace referencia al número de palabras que componen cada línea, el cual es calculado mediante la ecuación (4.11a). Una vez obtenida la anchura, se procede al cálculo del número de líneas que componen la imagen, el cual recibe el nombre de altura (*height*) (4.11a).

$$width = \frac{F_s}{2} \quad (4.11a)$$

$$height = \frac{longitud(s(t))}{width} \quad (4.11b)$$

En segundo lugar y una vez conocidas las dos características principales de la imagen, se presentan los datos en forma matricial, cuyas dimensiones son [*width x height*].

Finalmente, como la dimensión de cada línea en las imágenes APT es de 2080 palabras (ver Sección 2.2.2), es imprescindible ajustar la anchura de la matriz de datos para la obtención del correcto número de palabras por línea. En este proceso se descarta un conjunto de palabras con el objetivo de obtener la anchura de línea correspondiente, en otras palabras, se almacena una de

cada  $I$  palabras que componen la línea inicial de datos. El valor de la variable  $I$  se ha obtenido mediante (4.12).

$$I = \frac{width}{2080} \quad (4.12)$$

#### **4.5.4. Sincronización de la señal**

En la Sección 2.2.2 se han analizado las diferentes partes de una señal APT, definiendo las zonas de sincronización, marcas de tiempo y telemetría. El objetivo principal de las tramas de sincronización es establecer el inicio de cada línea de la imagen recibida. En este proceso interviene dos líneas: la inicial, que corresponde con la línea de la matriz de datos recibida de la señal APT y la sincronizada, la cual hace referencia a la nueva línea donde se disponen las palabras sincronizadas.

El proceso de sincronización se basa en un problema de correlación de muestras con dos vectores de entrada, en el que se halla la relación de similitud entre ambos vectores. En este apartado, una de las entradas está formada por el patrón de sincronización de los canales A y B, mientras que el otro vector es la línea inicial de datos. Finalmente, el resultado del proceso de correlación define la posición en la que ambos vectores tienen una gran similitud entre sus muestras y el valor de su parecido. Conviene subrayar, que cuando ambos vectores son similares el valor de la correlación es cercano a la unidad, sin embargo, cuando no se halla ninguna relación entre las entradas, el valor de la correlación es cero.

En las señales APT, los patrones de sincronización de los canales A y B son los expresados en el Código 4.1.

```

1 % Muestra del Canal A
2 syncA = [1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 ...
3           0 0 0 0 0 0 0 0 0] - 0.5;
4 % Muestra del Canal B
5 syncB = [1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 1 ...
6           1 0 0 1 1 1 0 0 0 0] - 0.5;

```

Código 4.1: Tramas de sincronización canal A y canal B.

En este proyecto se han desarrollado diferentes métodos de sincronización de la imagen con el fin de obtener el mejor resultado ante señales APT con mucho ruido. Las imágenes obtenidas

son el resultado del procesado de un fichero de audio con alta calidad, que no ha sido recibido en este proyecto, pero ha sido utilizado para las pruebas de software de procesado de imágenes.

### Sincronización por línea

El procedimiento de sincronización de la imagen por línea hace referencia al procesado de la imagen línea por línea. En este proceso se realiza el análisis individual de cada línea que forma la imagen, con la finalidad de sincronizar cada línea de manera independiente del resto de la imagen.

Mediante el proceso de correlación se obtiene el punto de la línea inicial donde se halla la máxima similitud con el patrón de sincronización y, por tanto, el punto que da comienzo a la nueva línea sincronizada. Desde este punto de la línea inicial se extraen 2080 palabras consecutivas, formando la nueva línea de la imagen.

En la Figura 4.17 se puede observar el resultado de la sincronización por línea. Mediante el uso de este tipo de sincronización se obtiene un buen resultado de la imagen, sin embargo, debido al efecto Doppler la sincronización no es perfecta y, por tanto, se pueden observar pequeñas desviaciones en la imagen.

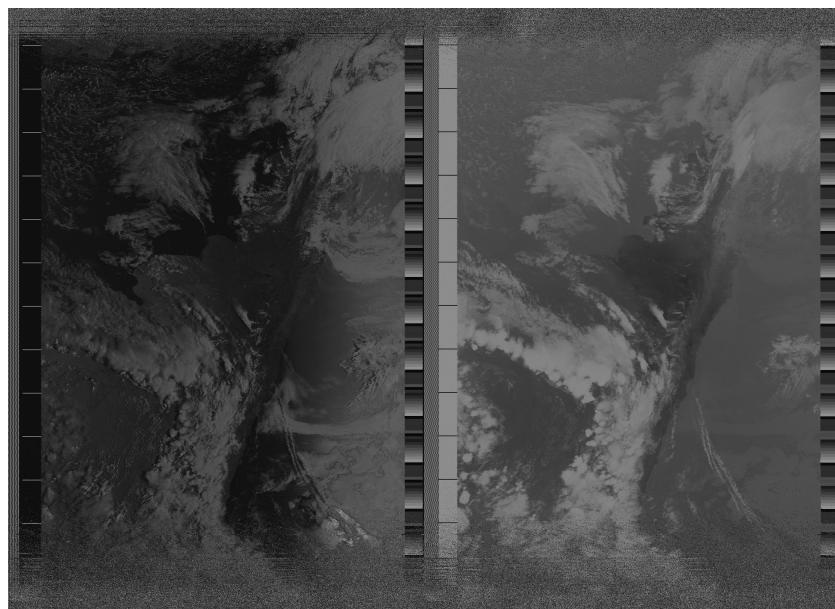


Figura 4.17: Ejemplo de la sincronización por línea de la imagen APT.

### Sincronización por trama temporal

La sincronización por trama temporal es el procesado de la imagen por secciones. La imagen APT se divide en secciones, o tramas temporales, que comienzan y terminan en cada marca temporal (Sección 2.2.2). A diferencia de la sincronización por línea, en este proceso intervienen dos problemas de correlación: la primera correlación es la encargada de dividir la imagen en las tramas correspondientes y, la segunda correlación es idéntica a la utilizada en la sincronización por línea.

El primer problema de este apartado es la división de la imagen en sus correspondientes tramas. Como se ha explicado en capítulos anteriores, las tramas son el conjunto de líneas que hay entre las marcas temporales de la imagen. En este proyecto se utiliza el proceso de correlación como mecanismo de localización del inicio de las tramas. El patrón en este problema de correlación se ha creado a partir de la marca de sincronización del canal A más el conjunto de bits blancos, en el caso de un canal de luz visible, que marcan el inicio de la marca temporal, ver Código 4.2.

```
1 % Muestra de tramas
2 syncT = [1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 ...
3           0 0 0 0 0 0 0 0 0, 1 1 1 1 1 1 1 1] - 0.5;
```

Código 4.2: Patrón de localización de tramas.

Después de realizar este proceso, se obtienen las líneas de la imagen inicial donde existen máximos en la función de correlación. Estas líneas son el comienzo de las tramas que forman la imagen APT.

El segundo problema de correlación consiste en localizar el punto de máxima correlación, junto al patrón del canal A, de cada línea de la imagen, tal como se ha explicado anteriormente en la Sección 4.5.4.

Una vez que se han realizado las dos correlaciones anteriores, se procede a la sincronización de cada trama. En la sincronización por línea se utilizaba el valor del máximo en su correlación para el desplazamiento de la línea, sin embargo, en este apartado la base de sincronización son las tramas. Por tanto, el desplazamiento de la trama se realiza mediante un desplazamiento uniforme de las líneas que la constituyen. En este proyecto, el valor de este desplazamiento se obtiene de tres formas diferentes mediante las funciones: media, moda y media ponderada.

## CAPÍTULO 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RECEPCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES EN FORMATO APT

---

- Media: se realiza la función media según la ecuación (4.13), para el desplazamiento de las líneas que forman la trama. Siendo la variable  $D$  el desplazamiento de la trama,  $d$  el desplazamiento individual de cada línea y  $N$  el número de líneas que forman la trama.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \quad (4.13)$$

- Moda: con este método se obtiene el valor de desplazamiento de la trama  $D$  según el valor de desplazamiento individual más repetido en el conjunto de líneas que constituyen la trama.
- Media ponderada: en este proceso es relevante la magnitud del desplazamiento de cada línea y la importancia de este desplazamiento. Esta importancia, o peso, es el valor obtenido en el proceso de correlación e indica el nivel de similitud entre el patrón y el punto máximo. Para hallar la media ponderada es necesario normalizar los pesos,  $p$  según (4.14a). Por último, mediante (4.14b) se obtiene la media ponderada,  $D$ .

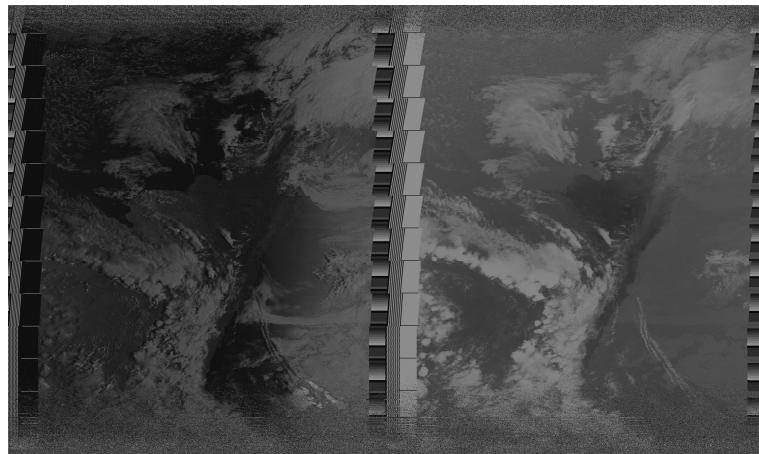
$$p'_i = \frac{p_i}{\sum_{k=1}^N d_k} \quad (4.14a)$$

$$D = \sum_{i=1}^N d_i \cdot p'_i \quad (4.14b)$$

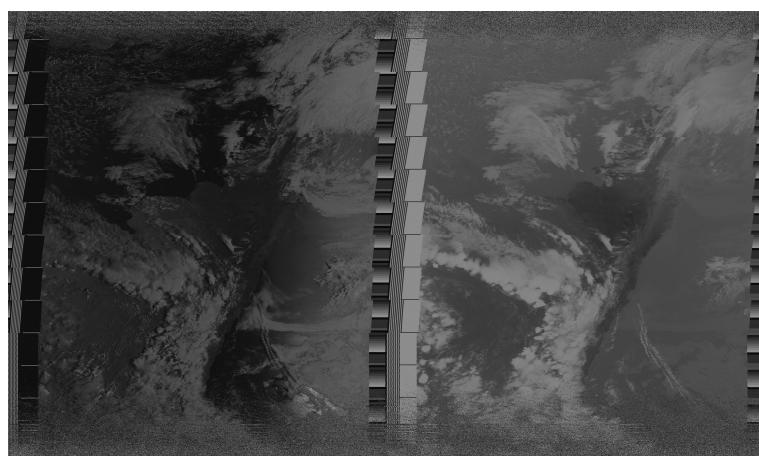
Finalmente, se desplazan las líneas pertenecientes a cada trama por el valor de desplazamiento obtenido anteriormente.

Las siguientes figuras muestran el resultado de la sincronización por trama en una imagen APT obtenida a partir de un fichero de audio de prueba con bajo nivel de ruido. Como se puede observar, los resultados obtenidos no son satisfactorios debido al efecto Doppler. En este caso, al igualar el desplazamiento de todas las líneas de una misma trama no reduce el efecto de distorsión en la Figura 4.18. En las tres figuras se puede observar el lugar en el que comienza cada trama, debido a este desplazamiento.

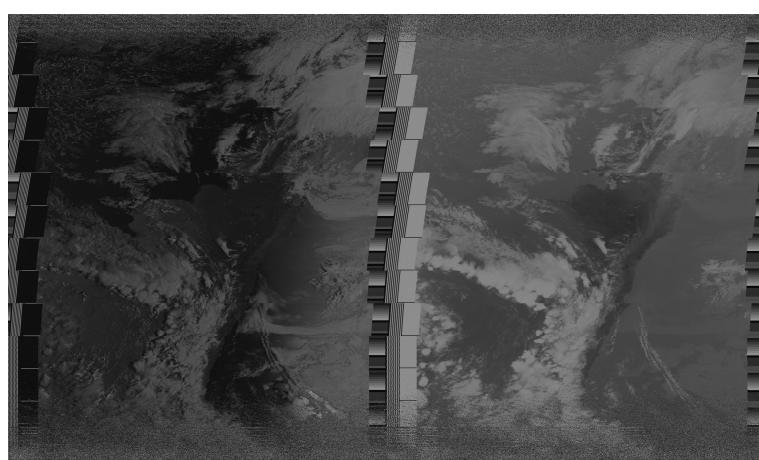
Son destacables los procesados a partir de la media y la moda debido a que realizan una mejor sincronización que el método de media ponderada. Sin embargo, en los tres métodos se observa una mejora en la sincronización en las últimas tramas que forman la imagen, esto es debido a que en estas últimas líneas el valor del desplazamiento es menor y, por tanto, el valor del desplazamiento de la trama corresponde. Es decir, en las últimas tramas se puede observar una sincronización muy similar a la producida en la sincronización por línea.



(a) Media.



(b) Moda.



(c) Media ponderada.

Figura 4.18: Ejemplos de sincronización por trama de la imagen APT.

### Sincronización uniforme

El último método de sincronización de la imagen APT analizado en este proyecto es la sincronización uniforme. Este proceso recibe el nombre de *uniforme* debido a que el desplazamiento realizado en todas las líneas de la imagen es del mismo valor.

En este apartado se realiza, del mismo modo que en la sincronización por línea, el proceso de correlación junto al patrón del canal A y, mediante este proceso, se obtiene el desplazamiento individual de las líneas. De modo que, el valor del desplazamiento uniforme utilizado en esta sincronización es el resultado de la media de los desplazamientos individuales.

Es necesario destacar, que debido al ruido inicial y final que presenta la imagen APT, en el cálculo del desplazamiento uniforme no se tienen en cuenta los desplazamientos individuales de las primeras y últimas líneas, con el objetivo de evitar valores no significativos.

Finalmente, la sincronización obtenida por el desplazamiento uniforme es la ilustrada por la Figura 4.19. Aunque este método no ha sido eficiente en la sincronización completa de la imagen, se observa una mayor linealidad respecto a la imagen original carente de sincronización.

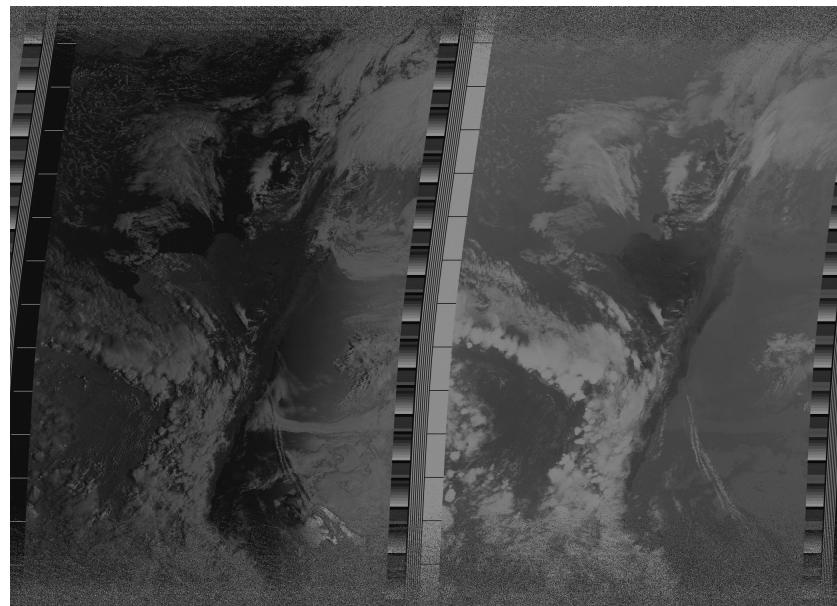


Figura 4.19: Ejemplo de sincronización uniforme de la imagen APT.

#### 4.5.5. Reducción del ruido de la señal APT

En las imágenes APT se pueden observar franjas con un alto nivel de ruido producido por la atenuación de la señal recibida. Cuando el satélite se encuentra más alejado de la estación

receptora la potencia de la señal recibida se ve reducida y, por tanto, la imagen decodificada muestra zonas de baja calidad visual.

Con el fin de reducir el ruido de las imágenes meteorológicas y aumentar la calidad de las mismas se pueden usar dispositivos para amplificar la potencia de la señal en la recepción. Sin embargo, en este proyecto no se han utilizado estos dispositivos. Por otro lado, el ruido de las imágenes se puede reducir mediante el procesado de la señal a partir de filtros FPB.

### Filtros Paso Bajo

Los filtros FPB son utilizados para eliminar las frecuencias altas de las imágenes, que son características del ruido y de los saltos de intensidad entre píxeles (fronteras). Este filtrado produce un efecto similar a atenuar la intensidad de los píxeles y, por tanto, se reduce notablemente la nitidez característica de la imagen. Existen diferentes tipos de filtros según la función de distribución utilizada. En este trabajo se ha hecho uso del filtro de Gauss, el filtro de Butterworth y el filtro Wiener.

- **Filtro de Gauss:** este filtro obtiene la intensidad del punto evaluado a partir del promedio de los diferentes valores de los píxeles vecinos a dicho punto. En la ecuación (4.15) se representa el filtro de Gauss, donde la variable  $\mu$  representa la media y  $\sigma$  es la desviación típica del filtro. Por otro lado, la variable  $x$  es el punto evaluado. Un mayor valor de  $\sigma$  representa un mayor número de puntos vecinos contabilizados en la ponderación y, por tanto, una mayor atenuación de la intensidad de la imagen.

$$h(x) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{\frac{-1}{2} \cdot \frac{x-\mu}{\sigma}} \quad (4.15)$$

- **Filtro de Butterworth:** sigue el mismo funcionamiento que el filtro de Gauss. Sin embargo, su diferencia reside en que este filtro es más abrupto. Por tanto, esto quiere decir que las imágenes obtenidas sufren una mayor atenuación. Las variables de la ecuación (4.16) representan los mismos parámetros explicados en el filtro de Gauss.

$$h(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^n} \quad (4.16)$$

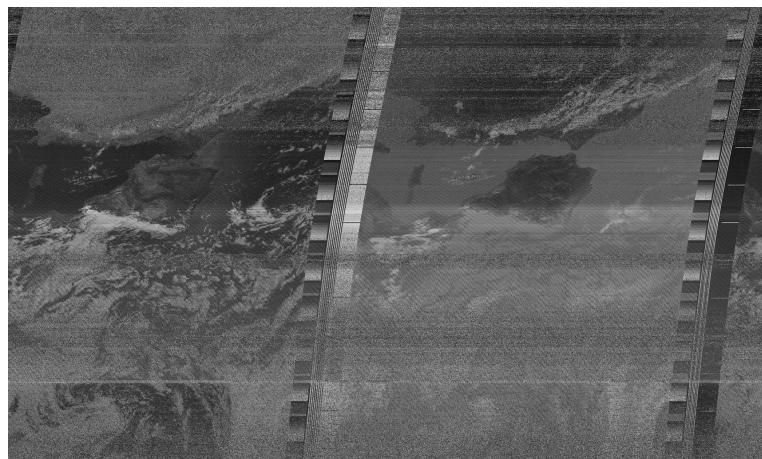
- **Filtro Wiener:** su filtrado se basa en la suposición de que el ruido aditivo que afecta a la imagen es un proceso aleatorio, estacionario e independiente. A diferencia de los filtros

de Gauss y Butterworth, este filtro no tiene una única frecuencia de corte. Por ello, en las regiones de la imagen con menor detalle, la frecuencia de corte utilizada es más baja que para las regiones con mayor detalle, dónde se aplica un corte superior. En (4.17) se representa el algoritmo del filtro Wiener.

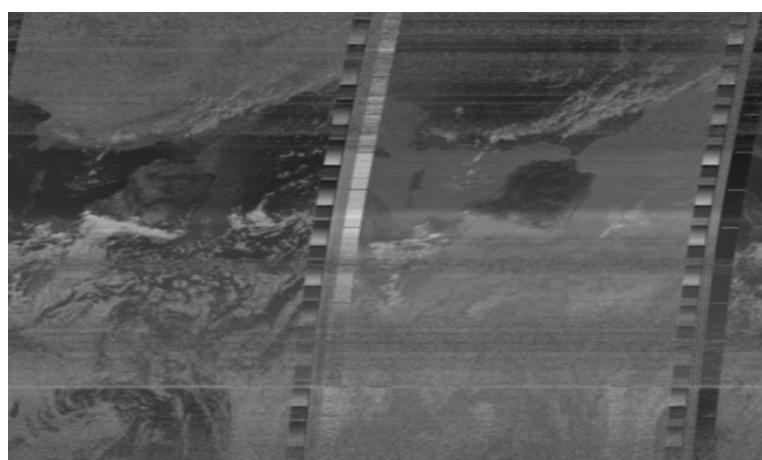
$$h(x) = \mu_x + (x - \mu_x) \cdot \frac{\nu_x}{\nu_x + \nu_n} \quad (4.17)$$

donde  $\mu_x$  y  $\nu_x$  es la media y la varianza de la variable  $x$ , respectivamente, y  $\nu_n$  representa la varianza del ruido.

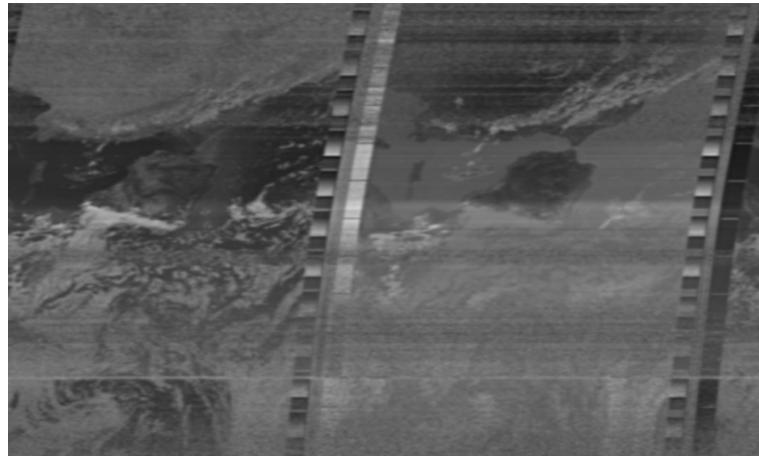
A continuación, una vez analizados los filtros utilizados en este trabajo, se procede a la convolución de la señal que se desea filtrar con el filtro. En primer lugar, con el fin de simplificar los cálculos del filtrado, se realiza la transformada de Fourier de la señal para obtenerla en el dominio de la frecuencia y poder multiplicar, en vez de convolucionar, la señal de audio con el filtro deseado. Finalmente, la señal resultante se debe pasar al dominio temporal mediante la transformada inversa de Fourier. A continuación, se muestran en la Figura 4.20 las cuatro imágenes que representan: la imagen sin filtrar, con el filtro de Gauss, con filtro de Butterworth y con el filtro Wiener. Se puede observar como las imágenes filtradas con los filtros Gauss y Butterworth difuminan al completo la imagen, lo que produce una pérdida de nitidez en toda la figura. Por otro lado, el filtro Wiener, filtra el ruido situado en la parte inferior de la imagen, pero al contrario que los otros filtros, mantiene la nitidez en la parte superior de la imagen. Por tanto, dado que los mejores resultados se obtienen con el filtro Wiener, es el utilizado en la aplicación de decodificación y procesado de imágenes desarrollada en este proyecto.



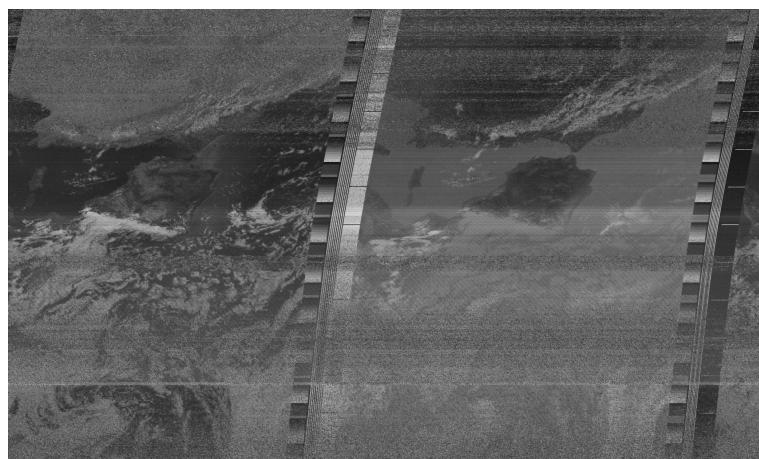
(a) Imagen sin filtrar.



(b) Imagen filtrada con el filtro de Gauss.



(c) Imagen filtrada con el filtro de Butterworth.



(d) Imagen filtrada con el filtro Wiener.

Figura 4.20: Reducción del ruido de la imagen APT con diferentes filtros.

#### 4.5.6. Falso color

La imagen APT, transmitida por los satélites NOAA, es decodificada en dos canales, los cuales representan la imagen meteorológica en escala de grises. Es decir, la imagen se ilustra con 256 niveles de gris en cada píxel.

El método de *falso color* es utilizado en la representación de los canales cuya longitud de onda no es visible para el ojo humano o en la identificación de ciertas características de la imagen. Como resultado de este procesado se obtiene una imagen **RGB** (rojo, verde y azul), la cual representa en pseudo-color condiciones meteorológicas como la temperatura de la Tierra, el estado de la atmósfera y la presencia de nubes.

Por lo tanto, en este trabajo se procede a aplicar un falso color a las imágenes que han sido procesadas. Para ello, cada píxel de la imagen se clasifica según su nivel en la escala de grises, siguiendo unos límites establecidos para la distinción entre vegetación (69), nubes (81) y agua (37). Estos límites tienen un valor preestablecido, sin embargo, se pueden modificar según requiera la imagen.

En primer lugar, se procede a la separación de los dos canales recibidos en la imagen para una mejor clasificación. Como resultado, se obtiene la imagen representativa del canal A y la imagen procedente del canal B. Esta separación es de utilidad en la elaboración de la imagen en falso color y, se debe tener en cuenta que ambas imágenes representan la misma toma de la Tierra y, cuya única diferencia es la longitud de onda de cada canal.

En segundo lugar, se clasifica cada píxel de la imagen según los límites establecidos. La clasificación se realiza sobre el píxel de un canal u otro según las necesidades de la categoría, aunque de forma predeterminada se establece sobre los píxeles del canal A. Por otro lado, la selección de grupo se realiza en el orden enunciado a continuación:

1. Valor inferior al límite del agua: en este caso, se clasifican los píxeles que ejemplifican el agua. Por tanto, en la nueva imagen creada estos píxeles se representan con un color azul.
2. Valor superior, del canal B, al límite de las nubes: los píxeles cuyos valores sean mayor a este límite son los que representan las nubes de la atmósfera y reciben un color blanco. En este grupo también se puede captar la nieve o el hielo de la imagen.
3. Valor inferior al límite de la vegetación: estos píxeles obtienen un color verde para la representación de la flora de la zona.

4. Valor inferior al límite de las nubes: en este nivel se representa el terreno o el desierto de la imagen. El color identificativo es el marrón.

Finalmente, en cada agrupación se realizan las tres matrices RGB, con diferentes ponderaciones para la obtención de los colores deseados, las cuales crean la imagen meteorológica en falso color. A continuación, se ilustra este método en la Figura 4.21. En ella se observa la clasificación de cada píxel según el color como, por ejemplo, las nubes son representadas por un color blanco y las zonas de vegetación en color verde.

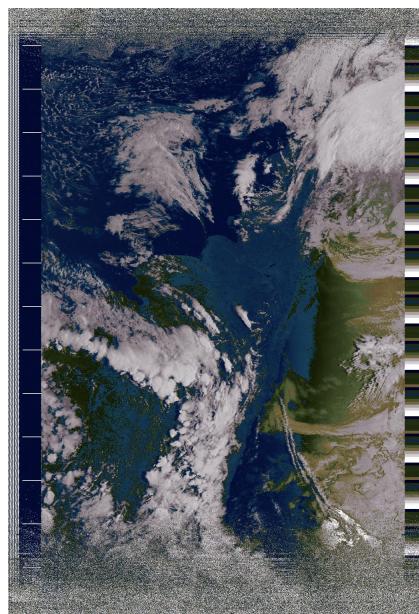


Figura 4.21: Imagen APT en falso color.

Por otro lado, existen diferentes clasificaciones según los datos que se quieran identificar en la imagen meteorológica. En este proyecto se ha elaborado la clasificación agua, vegetación y nubes, sin embargo, existe la posibilidad de establecer los colores según la temperatura de la Tierra.

Del mismo modo, la elaboración de la imagen en falso color puede establecerse siguiendo diferentes métodos de combinación, siendo uno de ellos la superposición de tres imágenes. En este apartado, cada canal de la imagen meteorológica se establece como una de las matrices RGB de la imagen en falso color. Dicho en otras palabras, el canal A se representa en color rojo y el canal B da lugar a la matriz de color verde y azul.

Finalmente, se obtiene la siguiente Figura 4.22. En esta imagen se pueden observar los límites establecidos en la Figura 4.21, sin embargo, la representación del color de cada píxel es diferente.

Por ejemplo, las nubes no toman un color blanco, si no que su color es azul. Por otro lado, las zonas que se pueden identificar como tierra o vegetación se representan con un color rojizo, mientras que, en la imagen superior se establece un color verde y marrón, los cuales dan más información sobre la representación.

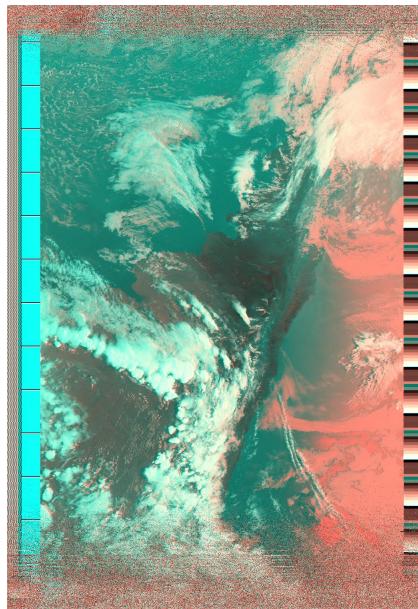


Figura 4.22: Imagen APT en falso color: matrices RGB a partir del canal A y el canal B.

#### 4.5.7. Aumentar el contraste de la imagen

Existen diferentes procesos para aumentar el contraste de la imagen recibida. En primer lugar, el histograma representa gráficamente la distribución de los niveles de intensidad de los píxeles, de una imagen. El eje horizontal del histograma representa el rango de valores en la escala de grises, desde el color negro hasta el color blanco, de 0 a 255, respectivamente. Por otro lado, el eje vertical representa el número de píxeles que toman un valor determinado en la escala de grises. En la Figura 4.23 se observa el ejemplo de un histograma de una imagen meteorológica en formato APT. En la imagen del histograma, se puede observar como la mayoría de los píxeles toman un valor entre 20 y 150 en la escala de grises, representando valores más oscuros y cercanos al color negro. Estos valores reciben el nombre de **rango dinámico**. Por otro lado, se muestra la imagen APT correspondiente al histograma analizado.

Para aumentar el contraste de la imagen se debe realizar una expansión del histograma o una ecualización del mismo. Este proceso aumenta el contraste de la imagen, dado que se expande el

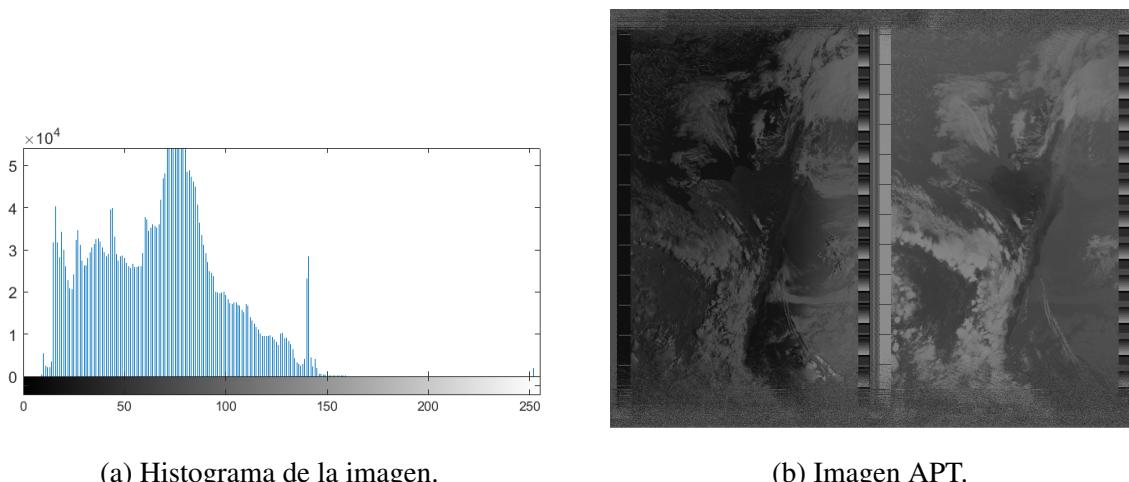


Figura 4.23: Ejemplo de una imagen APT y su histograma.

rango dinámico hasta abarcar todos los niveles del eje horizontal. Principalmente, existen dos métodos para llevar a cabo esta función: la **expansión** del rango dinámico y la **ecualización** del histograma [47].

La expansión del histograma, como su nombre indica, ajusta el rango dinámico de la imagen en la escala de valores de 0 a 255. Este método aumenta la distancia existente entre el valor mínimo y máximo del histograma, aumentando el contraste de la imagen. En la Figura 4.24 se representa el histograma obtenido anteriormente, ver Figura 4.23, al que se le ha implementado el método de expansión. Como se puede observar, la forma del histograma es la misma en ambas representaciones. Sin embargo, con el método de ajuste del histograma se observa como el rango dinámico representa la escala de grises completa. Por otro lado, en la imagen APT se observa mayor contraste que en la imagen original.

El segundo método para aplicar aumentar el constaste de una imagen es la ecualización del histograma. Este método consiste en obtener un histograma, mayormente, uniforme de los valores en toda la escala de grises. El proceso es menos utilizado que el método de expansión del histograma, dado que produce unas imágenes con un contraste muy artificial. Como se observa en la Figura 4.25, se representa el histograma ecualizado y la imagen resultado de este proceso, que se está usando como referencia. Se puede comprobar que la imagen resultante de la ecualización del histograma tiene un contraste más artificial que el contraste conseguido con el método de expansión. Por otro lado, el histograma resultante reparte de manera uniforme los valores de los píxeles, de la mejor manera posible.

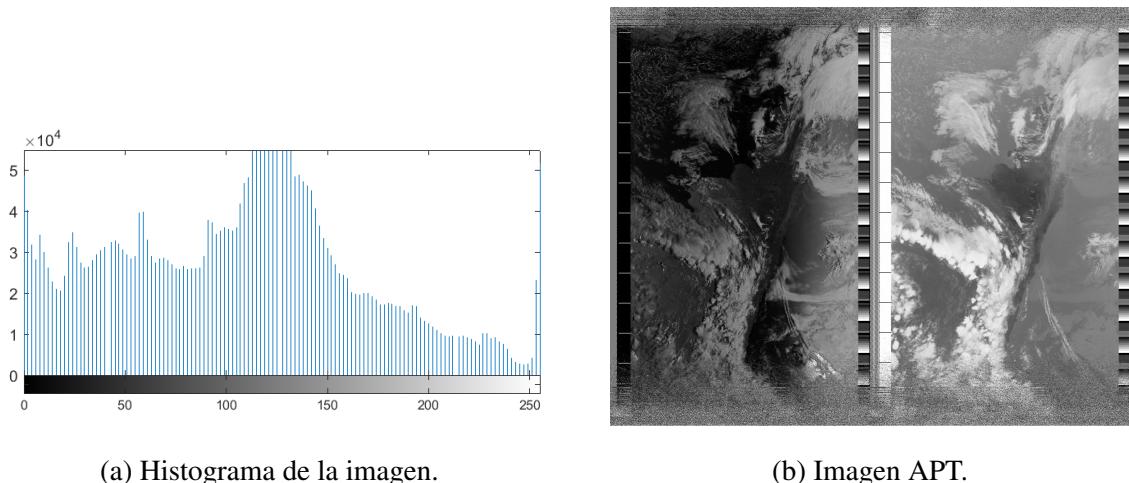


Figura 4.24: Ejemplo del aumento del contraste con el método de expansión de una imagen APT.

#### 4.5.8. Herramientas de recorte

La aplicación diseñada en este proyecto permite al usuario la modificación de ciertos aspectos de la imagen como la aplicación de falso color o el aumento del contraste. Sin embargo, también se dispone de herramientas de recorte. En este apartado se analizan los dos tipos de herramientas de recorte implementadas en la aplicación.

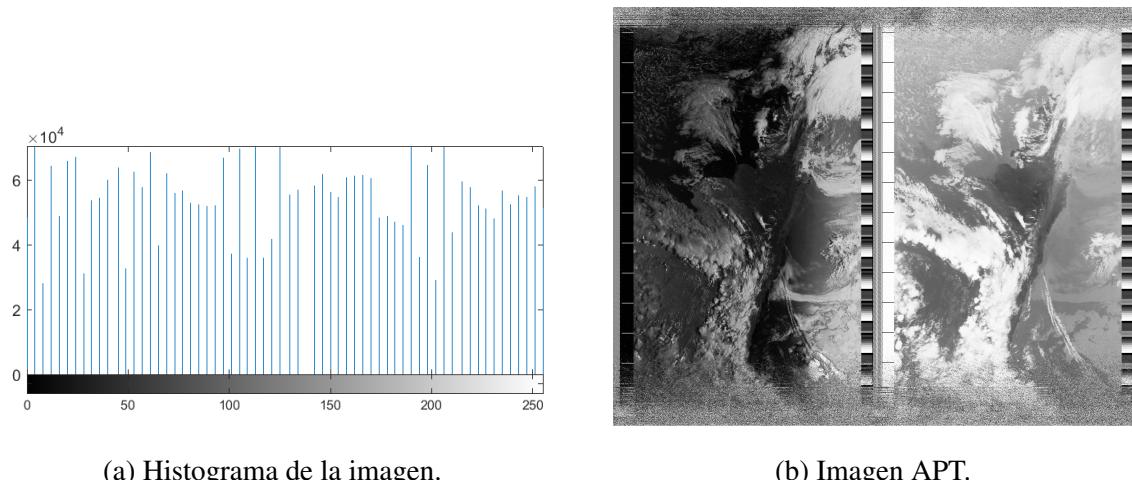
##### Recorte de una sección

Inicialmente, se obtiene la imagen completa después de la decodificación de la señal APT introducida en la aplicación. Sin embargo, en ocasiones es interesante obtener solo una determinada región. Por tanto, el usuario tiene la opción de realizar recortes de fragmentos específicos de la imagen.

Dicha opción es compatible con la versión original de la imagen, en blanco y negro, y la versión en falso color.

##### Recorte de información

En el estudio realizado sobre el formato de la señal APT, en la Sección 2.2.2, se ha documentado la importancia de las líneas de sincronización, las marcas temporales y las tramas de telemetría. No obstante, el principal objetivo de la señal es la obtención de la imagen satelital y, por tanto, se permite recortar las tramas de información de la imagen original, para obtener la



(a) Histograma de la imagen.

(b) Imagen APT.

Figura 4.25: Ejemplo del aumento del contraste con el método de ecualización de una imagen APT.

imagen APT meteorológica limpia.

El proceso aplicado para recortar las tramas de información es la eliminación de las palabras correspondientes. En la Figura 2.5 se observa como el bloque de sincronización y el temporal están formados por 86 palabras, por tanto, es necesario eliminar estas primeras palabras de cada línea que forma la imagen. Las siguientes 909 palabras son las que contienen la imagen satelital, así pues, deben conservarse. Después se halla el bloque de telemetría formato por 45 palabras, las cuales también deben eliminarse de cada línea de la imagen. Este proceso se ha realizado sobre la primera mitad de las líneas, correspondiente al canal A de la imagen. De la misma manera, se repite el proceso con la segunda mitad de las líneas.

Dicho de otra manera, las líneas estaban formadas por 2080 palabras que contenían toda la información y la propia imagen meteorológica. Sin embargo, en este proceso de recorte, la línea de la nueva imagen contiene 1818 palabras, que constituyen la imagen APT. El resultado obtenido es el ilustrado por la Figura 4.26.

CAPÍTULO 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RECEPCIÓN Y  
VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES EN FORMATO APT

---

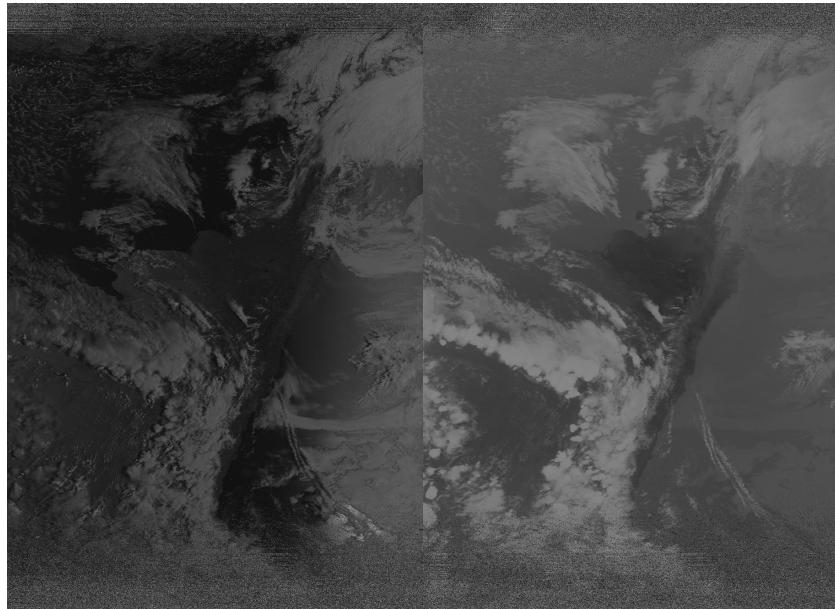


Figura 4.26: Imagen APT sin tramas de información.

# **Capítulo 5**

## **Resultados de las pruebas realizadas**

En este capítulo se presentan los resultados que se han obtenido en las diferentes pruebas realizadas con la estación receptora implementada en este proyecto. A continuación, se plantean las actividades realizadas para recibir la señal APT y decodificar la imagen meteorológica correspondiente.

### **5.1. Pasada del satélite NOAA-18**

Después de construir la antena QFH de este proyecto, ver Sección 4.3, se debe buscar la pasada del satélite NOAA-18 con el fin de realizar las pruebas de recepción en el momento adecuado.

A partir de la página web *Heavens Above*, analizada en la Sección 3.1.4, se obtuvo la pasada del satélite el día 3 de febrero de 2022, en Fuenlabrada (Madrid). En la Figura 5.1 se muestra la interfaz de la página *Heavens Above* con la información de la pasada de este día. Como se puede observar en la imagen, el satélite salía a las 11:32 a.m. y se ponía a las 11:45 a.m., por tanto solo se podía realizar la prueba en estos 13 minutos. Cabe destacar que la altura máxima se alcanzaba a las 11:40 a.m.

Por otro lado, el satélite comenzaba a ser visible en la dirección  $15^{\circ}$  noroeste y finalizaba su trayectoria visible en la dirección  $190^{\circ}$  sur.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

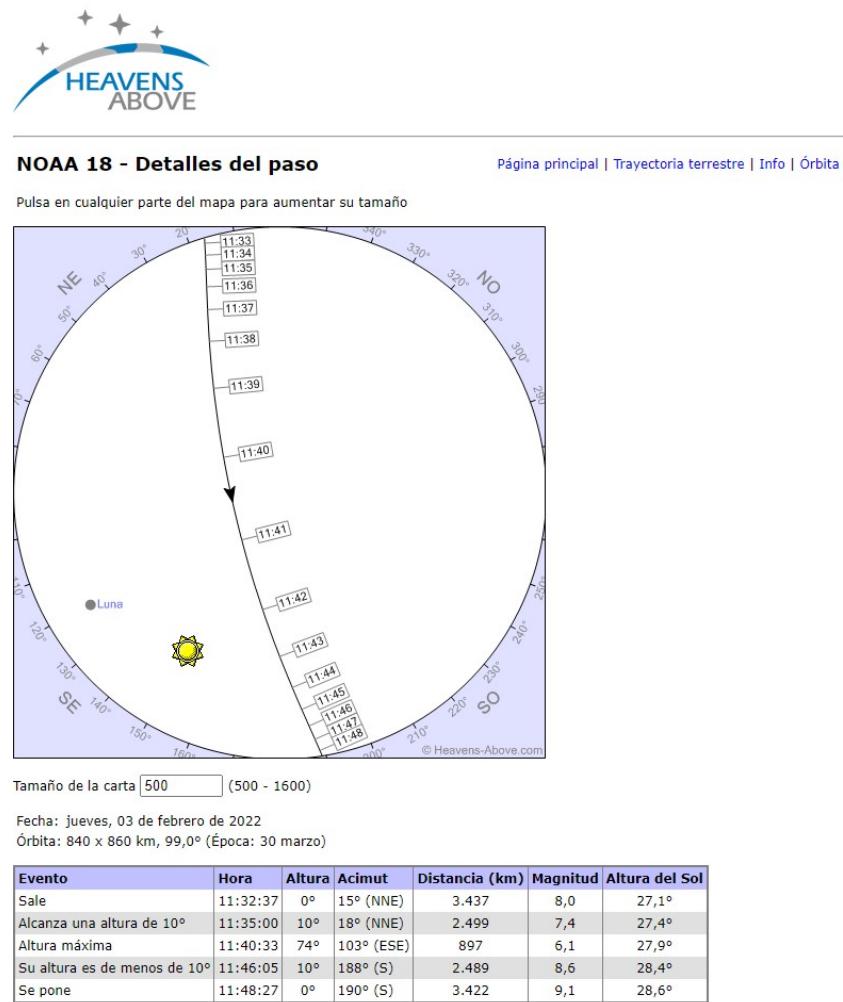


Figura 5.1: Pasada del satélite NOAA-18, el 3 de febrero de 2022.

## 5.2. Recepción y procesado de la señal APT con la estación receptora construida

Después de conocer la pasada del satélite, se instaló, en la URJC, la estación receptora implementada en el proyecto para comenzar a recibir la señal a la hora correspondiente. La antena utilizada en las pruebas ha sido la antena QFH construida en este trabajo.

Una vez que comenzó la pasada del satélite, se obtuvo su señal durante aproximadamente 10 minutos. Esta muestra de audio es suficiente para obtener la imagen APT decodificada. A partir del software de decodificación desarrollado en este trabajo (ver Sección 4.5), se obtuvo la imagen meteorológica correspondiente a la muestra de audio recibida.

En la Figura 5.2 se presentan dos imágenes para realizar la comparación entre la imagen

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

---

sincronizada y la imagen obtenida sin sincronización. Debido al efecto Doppler se puede observar el desplazamiento que sufren las líneas de la imagen APT sin sincronización. Con el fin de rectificar la imagen y obtener un mejor resultado, se ha aplicado un proceso de sincronización en la imagen recibida.

En las imágenes se observan algunas líneas en la parte superior con ruido debido a que estas líneas se corresponden con el momento en el que comienza a ser visible el satélite. Del mismo modo, las líneas inferiores muestran un ruido similar por la puesta del satélite. Sin embargo, se han obtenido muy buenos resultados dado que la mayor parte de la imagen se visualiza correctamente y con un nivel de ruido muy bajo. En el centro de la imagen se sitúa la Península Ibérica, sin embargo, a causa de las numerosas nubes que se observan, no se puede visualizar con mayor detalle.

Por otro lado, las marcas temporales de la imagen se componen por 10 bloques. Como se ha comentado anteriormente, la señal se captó en un periodo de 10 minutos y esto se ve reflejado en el número de bloques de las marcas de tiempo. Las líneas horizontales que representan el inicio de un nuevo bloque cada 60 segundos se representan de color blanco en la imagen de la izquierda y, de color negro, en la imagen de la derecha. Por ello, la primera imagen representa el canal visible, mientras que la segunda imagen se corresponde a un canal infrarrojo.

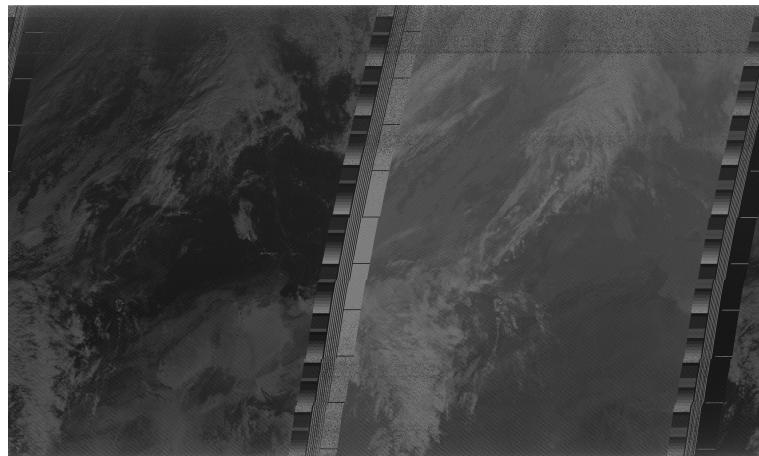
Además, mediante las franjas de telemetría se puede analizar en detalle los canales de cada imagen. En primer lugar, el bloque número 16 de la primera imagen representa el canal 1, un canal de luz visible apto para captar las nubes y la superficie terrestre. En segundo lugar, el mismo bloque de la segunda imagen representa el canal 4, un canal infrarrojo para captar las nubes y temperatura nocturna del mar.

Además de la imagen APT sincronizada, se ha aplicado el falso color de la imagen con el fin de ver con mayor claridad algunos detalles, ver Figura 5.3. En la parte izquierda de la imagen se puede observar un agrupamiento de nubes. Por otro lado, aunque el falso color no ha sido capaz de resaltar la Península Ibérica debido a los valores en la escala de grises en esta zona, sí se puede observar el norte de África en la parte inferior de imagen.

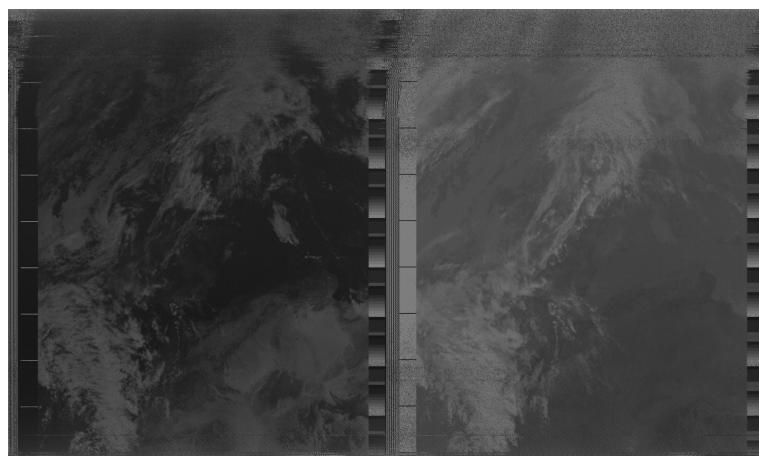
Finalmente, en la Figura 5.4 se muestra el resultado de aumentar el contraste de la imagen meteorológica recibida. Mediante este proceso, se observan con mayor claridad los detalles de la imagen.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

---



(a) Imagen meteorológica sin sincronizar.



(b) Imagen meteorológica sincronizada.

Figura 5.2: Imágenes meteorológicas obtenidas en la prueba del 3 de febrero de 2022.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

---

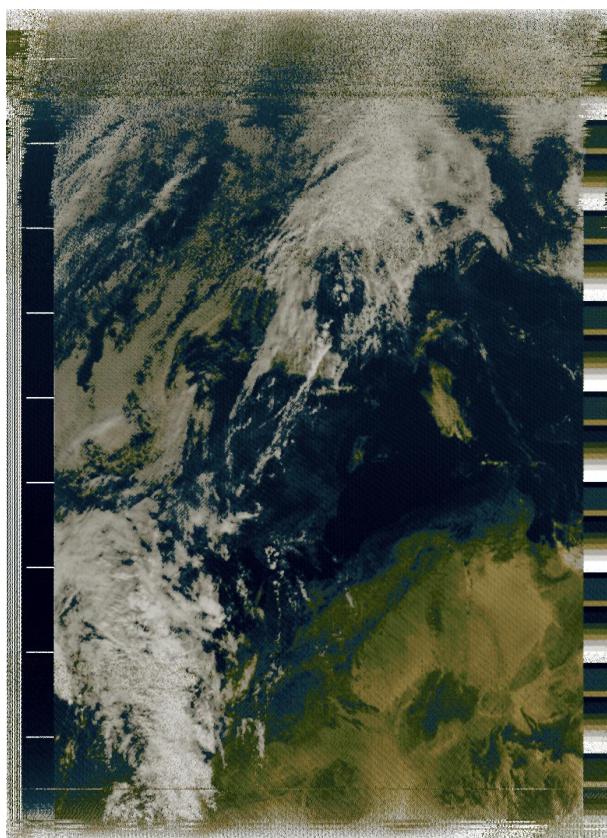


Figura 5.3: Imagen meteorológica con falso color.

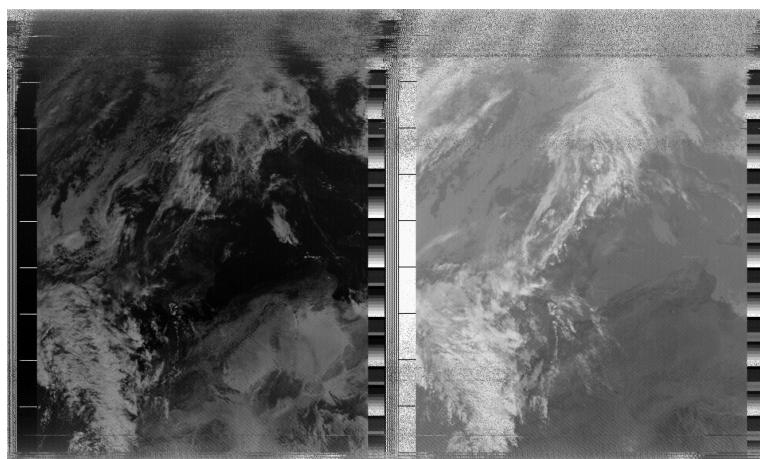


Figura 5.4: Imagen meteorológica con contraste.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

---

En último lugar, se muestra en la Figura 5.5 la imagen obtenida a partir del software comercial de procesado *NOAA APT*. Además, se representan dos herramientas de esta aplicación: la realización del falso color de la imagen y la superposición del mapa con las fronteras de cada país (Figuras 5.6 y 5.7).

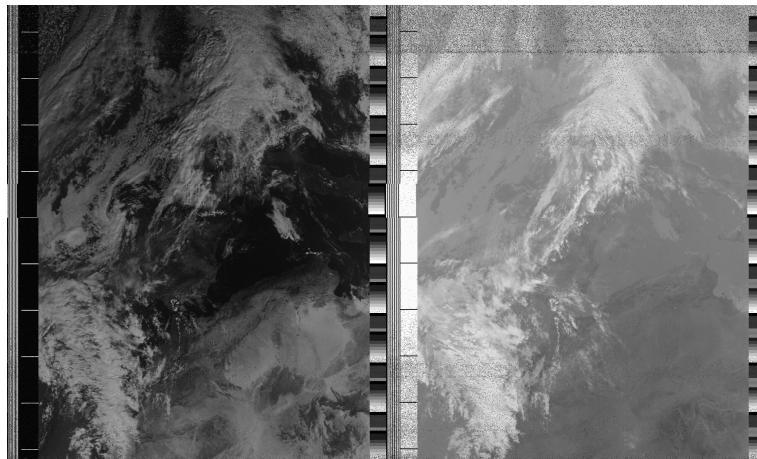


Figura 5.5: Imagen meteorológica procesada con NOAA APT.

La imagen a falso color obtenida con este software es muy similar a la obtenida con la aplicación NOAAPp diseñada en este proyecto. Como se observa en la imagen, debido a las nubes y a los niveles de gris de la imagen, no se puede mostrar con precisión la Península Ibérica.

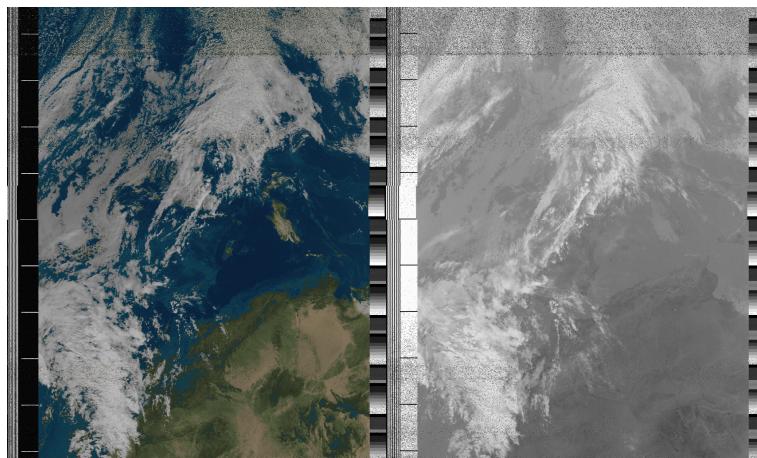


Figura 5.6: Imagen meteorológica a falso color procesada con NOAA APT.

Por otro lado, la herramienta que procesa la imagen y la superpone al mapa con las fronteras de los países (en color amarillo) ayuda en gran medida a reconocer la zona visualizada en la imagen meteorológica decodificada.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

---

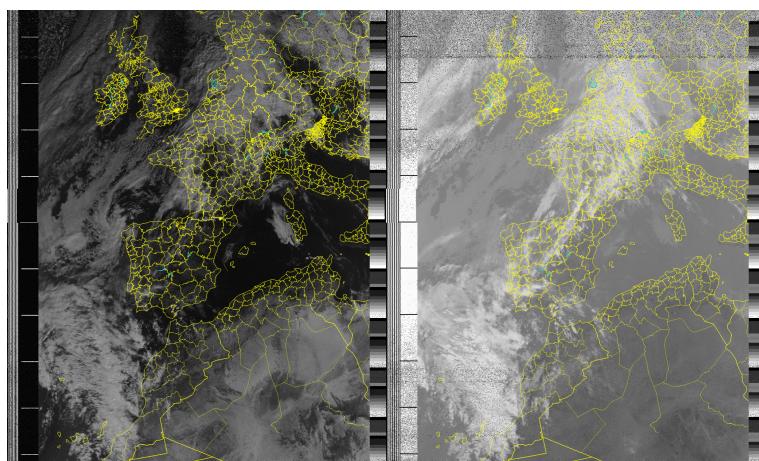


Figura 5.7: Imagen meteorológica con las fronteras de los países procesada con NOAA APT.

# Capítulo 6

## Conclusiones

En este TFG se ha realizado un estudio basado en los componentes que integran el segmento terreno de las comunicaciones vía satélite en una aplicación de recepción de imágenes meteorológicas. Centrado en el satélite NOAA-18, se ha implementado una estación receptora compuesta por la antena QFH, el receptor SDR y el software de decodificación y procesado, con el objetivo de recibir la señal APT transmitida por el satélite y obtener la imagen meteorológica decodificada.

Inicialmente, se ha construido una antena QFH debido a sus buenas prestaciones en la recepción de señales APT. Los parámetros que caracterizan la antena se han obtenido a partir de las simulaciones realizadas en el programa *Feko*. No ha sido necesario instalar un sistema de posicionamiento de la antena dado que dispone de un diagrama de radiación omnidireccional en el plano superior, apto para recepción de la señal, a partir de la instalación fija de la antena.

Finalmente, se ha utilizado la aplicación diseñada en este trabajo para la decodificación y procesado de la señal APT recibida. A partir del audio recibido por la antena QFH, la aplicación ha decodificado la imagen meteorológica con muy buenos resultados. Cabe destacar el bajo nivel de ruido que presenta la imagen decodificada y la buena sincronización realizada. El código fuente se encuentra en un **repositorio** público de *GitHub* [48].

## 6.1. Líneas Futuras

Después de implementar la estación terrena, se describen varias líneas de investigación en base a este trabajo.

- Aplicación de las imágenes obtenidas en proyectos de investigación: las imágenes APT decodificadas y procesadas por la aplicación NOAAApp pueden ser la base de proyectos de investigación centrados en las características meteorológicas de la Tierra. A partir de las imágenes APT se puede obtener la información que caracteriza la atmósfera y los océanos de la Tierra.
- Desarrollo de una aplicación en otros entornos: la aplicación de decodificación y procesado de las imágenes APT se ha implementado en el entorno del programa *Matlab*. La licencia de este programa no es gratuita, por tanto, el código desarrollado puede ser implementado en otros lenguajes de programación como por ejemplo *Rust*, con el objetivo de facilitar el desarrollo de la aplicación en diferentes sistemas operativos como *Linux* o *Windows* y, reducir los costes de su implementación.
- Implementación de una estación de seguimiento: en este proyecto se ha orientado manualmente la antena en la recepción de la señal APT. Con el objetivo de obtener una orientación con mayor precisión, puede implementarse una estación de seguimiento que mantenga la posición de la antena apuntando al satélite en la recepción de la señal.
- Apoyo a la docencia: el software desarrollado para la aplicación NOAAApp puede ser implementado como material de apoyo a la docencia en asignaturas centradas en el procesado de imágenes. Para ello, se puede añadir la herramienta de ruido en la aplicación. Esta opción ofrece la posibilidad de utilizar diferentes filtros para la corrección del ruido de la imagen recibida, con el fin de observar los resultados obtenidos con cada filtrado.

# Bibliografía

- [1] *WMO OSCAR — Satellite: NOAA-17*, inglés, 2021. dirección: [https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/noaa\\_17](https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/noaa_17) (visitado 22-11-2021).
- [2] *Resumen de las Ventajas y Limitaciones*, 21 de oct. de 2004. dirección: <https://rammb.cira.colostate.edu/wmopl/vrl/tutorials/euromet/courses/spanish/satmet/s3220/s3220315.htm>.
- [3] OSPO, *Office of Satellite and Product Operations - POES*, 3 de jun. de 2020. dirección: <https://www.ospo.noaa.gov/Operations/POES/index.html>.
- [4] NOAA, *History of NOAA Satellites*, inglés, sep. de 2021. dirección: <https://www.nesdis.noaa.gov/current-satellite-missions/history-of-noaa-satellites>.
- [5] EUMETSAT, *Metop series*, inglés, 7 de mar. de 2022. dirección: <https://www.eumetsat.int/our-satellites/metop-series> (visitado 25-01-2022).
- [6] CMA, *Fengyun-3 Series Satellites*, 2020. dirección: [http://www.cma.gov.cn/en2014/20150311/20210702/2021070205/202107/t20210702\\_579926.html](http://www.cma.gov.cn/en2014/20150311/20210702/2021070205/202107/t20210702_579926.html) (visitado 25-01-2022).
- [7] C. Peat, *NOAA 18 - Orbit*, inglés. dirección: <https://www.heavens-above.com/orbit.aspx?satid=28654&lat=0&lng=0&loc=Unspecified&alt=0&tz=UCT> (visitado 19-02-2022).
- [8] P. Alonso, *Plataformas, sensores y canales*, 15 de dic. de 2003. dirección: <https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema03.pdf>.
- [9] A. Arboleya Arboleya, *El formato de imágenes APT de los satélites NOAA*, 2014. dirección: <https://docplayer.es/87316039-El-formato-de-imagenes-apt-de-los-satelites-noaa.html>.
- [10] R. Rivas, *Resoluciones en Teledetección*, 2012. dirección: [http://cursosihlla.bdh.org.ar/Geo\\_UNS\\_2014/3\\_Bonus/2%20Resoluciones%20en%20Teledetecci%c3%b3n.pdf](http://cursosihlla.bdh.org.ar/Geo_UNS_2014/3_Bonus/2%20Resoluciones%20en%20Teledetecci%c3%b3n.pdf).
- [11] E. García Luengo, *AVHRR*, sep. de 2011. dirección: <https://ea3atl.ure.es/satsmet/avhrr.htm>.

## BIBLIOGRAFÍA

- [12] F. Alonso Sarría, «Sistemas de Información Geográfica,» 2006. dirección: <https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>.
  - [13] *WXtoImg*, prog., ver. 2.10.11. dirección: <https://wxtoimgrestored.xyz/>.
  - [14] A. Carlson, P. Crilly y J. Rutledge, *Communication Systems*, inglés, 4.<sup>a</sup> ed. McGraw-Hill Education, 2002.
  - [15] L. Nicolae Crisan, «NOAA Signal decoding and image processing using GNU-Radio,» 2012. dirección: [https://www.researchgate.net/publication/247969930\\_artic8](https://www.researchgate.net/publication/247969930_artic8).
  - [16] PromocionMusical, *Efectos de Modulación: Cuáles Son y Cómo Aplicarlos a Tu Música*, 13 de nov. de 2020. dirección: <https://promocionmusical.es/teoria-musical/efectos-modulacion/>.
  - [17] B. Vera Navides, «Diseño y construcción de una antena cuadrifilar helicoidal para recepción de imágenes transmitidas por satélites de órbita polar,» feb. de 2012. dirección: <http://hdl.handle.net/2099.1/15026>.
  - [18] *Isótropa*, en 2021. dirección: <https://www.tesamerica.com/faq/una-antena-isotropica/>.
  - [19] M. Ferrando Bataller y A. Valero Nogueira, *Ganancia*. dirección: [http://www.upv.es/antenas/Tema\\_1/ganancia.htm#:%7E:text=En%20la%20definici%C3%B3n%20de%20Directividad,antena%2C%20debida%20a%20p%C3%A9rdidas%20%C3%B3hmicas..](http://www.upv.es/antenas/Tema_1/ganancia.htm#:%7E:text=En%20la%20definici%C3%B3n%20de%20Directividad,antena%2C%20debida%20a%20p%C3%A9rdidas%20%C3%B3hmicas..)
  - [20] Leedeo engineering, *Diagramas de radiación*, 2019. dirección: <https://www.leedeo.es/la-antena-de-gps-y-sistemas-gps-mejorados/>.
  - [21] Altair Feko, prog., ver. 2021.1, 2021. dirección: <https://www.altair.com.es/feko-applications/>.
  - [22] S. Roy, *Yagi Uda Antenna — 3 design parameters and important uses*, inglés, 22 de mayo de 2021. dirección: <https://es.lambdageeks.com/yagi-uda-antenna-design/>.
  - [23] T. E. Cordoví Rodríguez, R. Jiménez Hernández y D. Beltrán Casanova, «Propuestas de antenas activas para la recepción de la televisión digital terrestre en Cuba,» nov. de 2016.
  - [24] C. Peat, *Heavens-Above*, inglés, 2022. dirección: <https://www.heavens-above.com/> (visitado 19-02-2022).

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [25] S. Stoff, *Satellite Tracking System: Orbitron by Sebastian Stoff / Satellite tracking easiest ever!* Inglés, 2007. dirección: <http://www.stoff.pl/>.
- [26] BIRTLH, *Ángulo de elevación y azimut.* dirección: [https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/ICTV/ICTV06/es\\_IEA\\_ICTV06\\_Contenidos/website\\_index.html#](https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/ICTV/ICTV06/es_IEA_ICTV06_Contenidos/website_index.html#).
- [27] J. Coppens, *Antena QFH*, 2010. dirección: <http://jcoppens.com/ant/qfh/adapt.php>.
- [28] *Cenit*, en *REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: Diccionario de la lengua española*, 23.<sup>a</sup> ed., 2022. dirección: <https://dle.rae.es/cenit>.
- [29] G. Martes, *Antena Double Cross*, feb. de 2008. dirección: [https://web.archive.org/web/20160403221532/http://noaaport.poes-weather.com/download/jm-dca/MARTES\\_Double\\_Cross\\_Antenna.pdf](https://web.archive.org/web/20160403221532/http://noaaport.poes-weather.com/download/jm-dca/MARTES_Double_Cross_Antenna.pdf).
- [30] Baofeng, *WalkieTalkie BAOFENG UV-3R+*. dirección: <https://baofeng.es/walkie-talkies/baofeng-uv-3r-camuflaje.html>.
- [31] J. A. Berzal Fernández, *SDR: Software Defined Radio*, 2021.
- [32] G. Montenegro Cháidez, V. I. Rodríguez Abdalá y F. R. Castillo Soria, «Radio definido por software, futuro de las comunicaciones inalámbricas,» *Universitarios Potosinos*, vol. 234, págs. 24-29, 2019. dirección: <http://www.uaslp.mx/Comunicacion-Social/Documents/Divulgacion/Revista/Quince/Universitarios%20Potosinos%2020234.pdf>.
- [33] *GNU Radio*, prog., ver. 3.9.5, 2021. dirección: <https://www.gnuradio.org/>.
- [34] Nooelec, *Receptor Nooelec NESDR Mini 2 + 0.5PPM TCXO USB RTL-SDR*, 2022. dirección: <https://www.nooelec.com/store/sdr/sdr-receivers/nedr-mini-2-plus.html>.
- [35] *WRAASE electronic — Weather Satellite Receiver Systems*, inglés, 2021. dirección: <https://www.wraase.de/> (visitado 12-03-2022).
- [36] *NOAA APT decoder*, prog., ver. 1.3.1, 2021. dirección: <https://noaa-apt.mbernardi.com.ar/>.
- [37] M. Bernardi, *GitHub - martinber/noaa-apt: NOAA APT weather satellite image decoder, for Linux, Windows, RPi 2+, OSX and Android+Termux*, inglés, 2022. dirección: <https://github.com/martinber/noaa-apt> (visitado 13-03-2022).
- [38] M. Calvo Ramón y R. Martínez Rodríguez-Osorio, *Balance de enlace*, 2009. dirección: <https://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/material/CSA08-4-BalanceEnlace1.pdf>.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [39] V. Dascal, P. Dolea, O. Cristea y T. Palade, «Advanced VHF ground station for NOAA weather satellite APT image reception,» *Acta Technica Napocensis*, vol. 53, n.º 3, 2012. dirección: [https://users.utcluj.ro/~atn/papers/ATN\\_3\\_2012\\_1.pdf](https://users.utcluj.ro/~atn/papers/ATN_3_2012_1.pdf) (visitado 13-03-2022).
- [40] J. Coppens, *Antenas - Helicoidal cuadrifilar - Calculadora Javascript en línea*. dirección: <http://jcoppens.com/ant/qfh/calc.php>.
- [41] *AutoCAD*, prog., 2022. dirección: <https://www.autodesk.es/products/autocad/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>.
- [42] F. López, *CHOKE RF. ¿QUE ES?* Dirección: <http://pacosbalun.blogspot.com/p/choke-rf.html>.
- [43] *Radomo*, en 2022. dirección: <https://diccionario.raing.es/es/lema/radomo>.
- [44] *Anecoico*, en 23.<sup>a</sup> ed., 2022. dirección: <https://dle.rae.es/anecoico>.
- [45] A. Camacho García, *Diezmado e interpolacion*, inglés, ene. de 2009. dirección: <https://polimedia.upv.es/visor/?id=9f98fa1a-1ab5-9246-b9d5-5bb1f710e29d>.
- [46] J. Blázquez, A. García-Berrocal Sánchez, M. Balbás Antán y C. Montalvo Martín, «Aplicación de las transformadas de Hilbert a la dinámica de una pala de aerogenerador,» en *Anales de ingeniería mecánica. Actas del XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica CNIM 2010*, España: Grupo de Ingeniería Mecánica, 2010. dirección: <http://oa.upm.es/8171/>.
- [47] *Histograma de imagen y ecualización de histograma - programador clic*. dirección: <https://programmerclick.com/article/86151112183/> (visitado 28-03-2022).
- [48] R. Navarro Villarino, *GitHub - RooNV/TFG-GPR-Ingenieria-Aeroespacial*, inglés, 2022. dirección: [https://github.com/RooNV/TFG\\_NOAApp\\_IngTecnologiasTelecomunicaciones](https://github.com/RooNV/TFG_NOAApp_IngTecnologiasTelecomunicaciones).



# **Apéndices**

# Apéndice A

## Manual de usuario de la aplicación NOAApp

En este apéndice se presenta el manual de usuario de la aplicación desarrollada en este proyecto, NOAApp. El objetivo principal de la aplicación es la decodificación y procesado de imágenes a partir de los archivos de audio transmitidos por los satélites NOAA.

Las herramientas de la aplicación NOAApp se dividen en tres pantallas. Las ventanas reciben los nombres de **Inicio**, **Procesado** y **Visualización**. El usuario pasa de una ventana a otra hasta obtener finalmente la imagen en meteorológica correspondiente al audio de entrada. A continuación, se explica en detalle cada pantalla,

### A.1. Ventana de Inicio

La primera imagen que el usuario ve de la aplicación es la ventana de *Inicio*. Esta pantalla se ha diseñado con una interfaz sencilla, con el fin de ofrecer al usuario un acceso claro a la aplicación. La finalidad principal de esta pantalla es la introducción del archivo de audio en formato *wav* que se quiere decodificar. En la Figura A.1 se visualiza la pantalla *Inicio* al completo.

## APÉNDICE A. MANUAL DE USUARIO

---

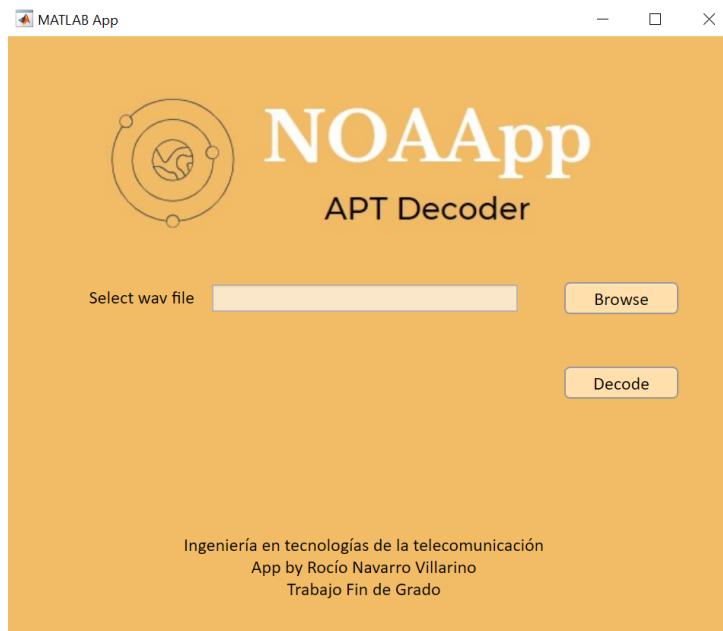


Figura A.1: Interfaz de la ventana Inicio.

En primer lugar, el usuario debe presionar el botón *Browse* cuya función es la búsqueda del archivo en el sistema. Cabe destacar que de manera predeterminada los archivos mostrados son en formato *wav*. Este formato es utilizado para almacenar sonidos, tales como música o voces y, se pueden abrir en programas de reproducción de audio. Una vez seleccionado el archivo deseado, el nombre del fichero aparece en el recuadro *Select wav file*, ver Figura A.2.

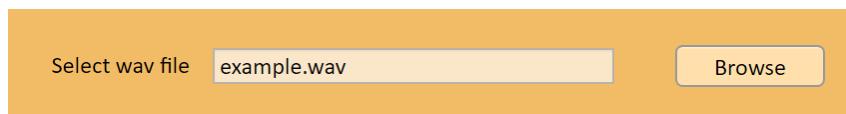


Figura A.2: Selección del fichero wav.

Una vez seleccionado el fichero de audio, el usuario debe presionar el botón *Decode* que da inicio al procesado y sincronización de la imagen APT. En este momento, se muestra en pantalla el mensaje que anuncia el inicio del procesado del archivo, como se observa en la Figura A.3.

---

## APÉNDICE A. MANUAL DE USUARIO

---

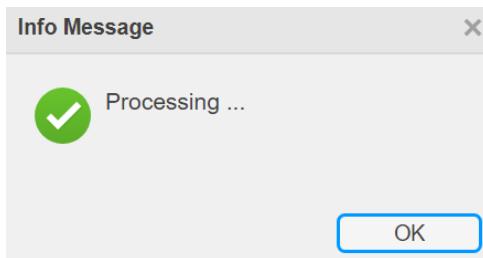


Figura A.3: Mensaje de información de procesado del archivo.

Por otro lado, la aplicación muestra un mensaje de error si el usuario ha presionado el botón *Decode* sin haber introducido un archivo en formato *wav* (Figura A.4). En este caso, es necesario volver a realizar la búsqueda del archivo de audio correcto y presionar el botón *Decode*.

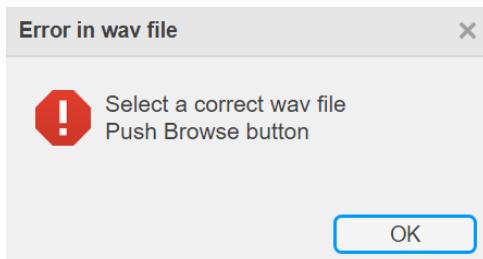


Figura A.4: Mensaje de información de error en el archivo.

Finalmente, tras concluir las tareas en esta pantalla y presionar el botón *Decode*, la ventana de *Inicio* se cierra y aparecen en pantalla las pestañas de *Procesado* y *Visualización* .

## A.2. Ventana de Procesado

La ventana de *Procesado* aparece una vez se ha introducido un fichero de audio. En este momento, la aplicación ha procesado el archivo y se ha realizado la sincronización por línea. Este proceso ha sido explicado en la Sección 4.5.4.

En la Figura A.5 se puede observar la interfaz de la ventana de *Procesado*. En ella destacan dos pestañas, que están compuestas por las herramientas para la modificación visual de la imagen meteorológica decodificada. Por otro lado, la función principal del botón *Select wav file*, localizado en la parte inferior izquierda de la ventana, es retroceder a la pantalla de *Inicio*, con el fin de introducir un nuevo fichero de audio.

## APÉNDICE A. MANUAL DE USUARIO

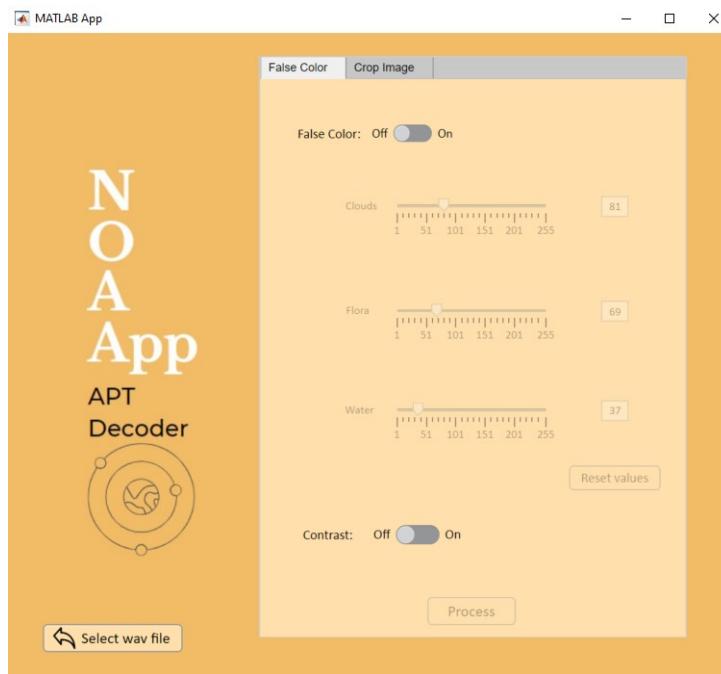
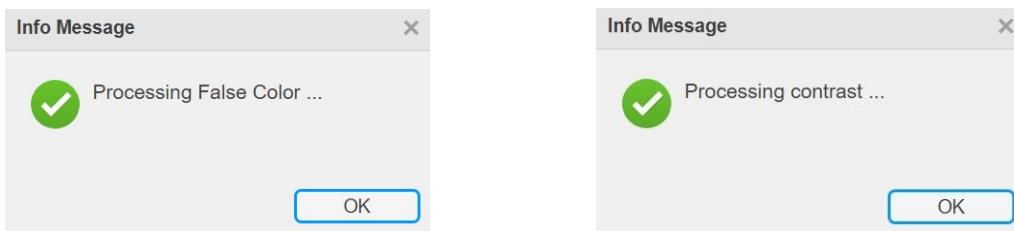


Figura A.5: Interfaz de la ventana Procesado: False color.

En primer lugar y de manera predeterminada, se observa la pestaña de *False Color*, formada por dos componentes: *False Color* y *Contrast*. Inicialmente, ambos apartados no son editables, sin embargo, se activan al cambiar el interruptor a su posición de encendido, *On*. Una vez activados, aparece en pantalla la ventana *Visualización*, que muestra la imagen resultante del falso color o del contraste, según la opción seleccionada.

Por otro lado, en la Figura A.6 se presentan los mensajes de información al usuario que confirman la selección de los interruptores.



(a) False color.

(b) Contrast.

Figura A.6: Mensajes de información en la ventana de Procesado.

En primer lugar, al activar la herramienta de falso color se comienza el proceso explicado en la Sección 4.5.6. Además, los controles para la modificación de los límites de vegetación,

## APÉNDICE A. MANUAL DE USUARIO

---

agua y nubes, el botón *Process* y el botón *Reset Values* se activan. A continuación, el usuario puede ajustar los límites mediante los controles de desplazamiento, *sliders*, y finalmente aceptar los cambios con el botón *Process*, con el que se comienza el procesado del falso color con los nuevos parámetros y se muestra la nueva imagen APT en una nueva pantalla de *Visualización*.

La última herramienta de este apartado es el botón *Reset values*, el cual proporciona la opción de establecer el valor de inicio a los límites de vegetación, agua y nubes. La confirmación de esta opción debe realizarse presionando el botón *Process*.

La Figura A.7 se presenta la ventana *Procesado* con las opciones de falso color habilitadas.

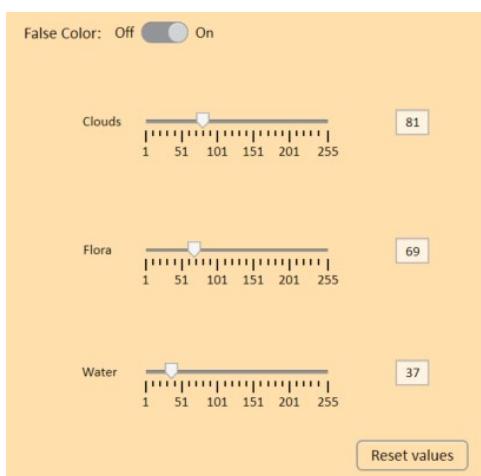


Figura A.7: Opciones del falso color.

Por otro lado, *Crop Image*, o *recortes de la imagen* en su traducción al español, es la segunda pestaña de opciones en la ventana de *Procesado*. En esta pestaña se ofrece la opción de recortar fragmentos de la imagen sincronizada. La Figura A.8 muestra la pestaña *Crop Image* de esta ventana. En la parte superior, se presenta una breve descripción del proceso de recorte de la imagen. Por otro lado, en el pie del recuadro explicativo se encuentran los botones *Crop Black & White Image* y *Crop Color Image*. El primero proporciona la imagen original en blanco y negro, para realizar el recorte y el segundo, la imagen en falso color. Después de seleccionar el fragmento de la imagen deseado, aparece en pantalla una nueva ventana de *Visualización* con la selección realizada.

Al mismo tiempo, en la pestaña *Crop Image* se muestra la opción de *Crop Information*. Esta herramienta realiza el corte de la información de la imagen, integrada por los bloques de sincronización, telemetría y marcas temporales. Este proceso se ha explicado anteriormente en la

#### Sección 4.5.8.

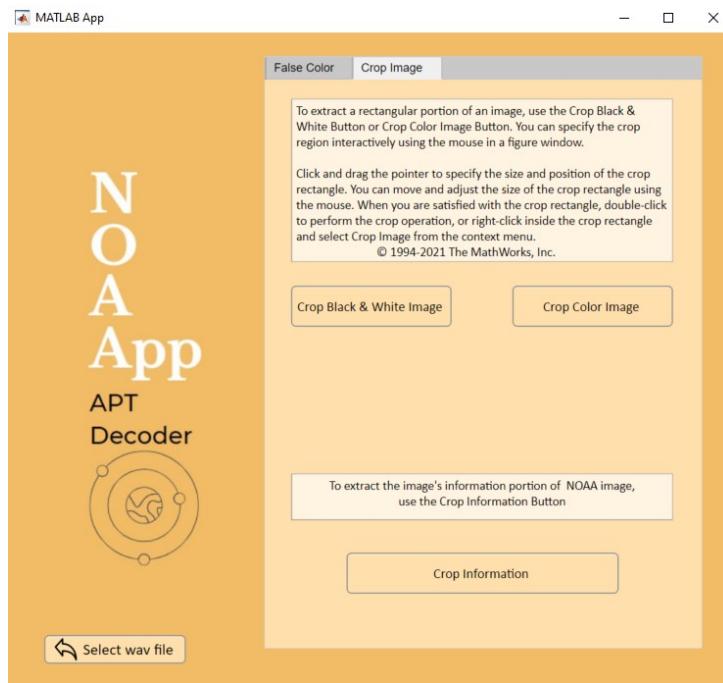


Figura A.8: Interfaz de la ventana Procesado: Crop image.

### A.3. Ventana de Visualización

La tercera ventana que completa la aplicación NOAApp es *Visualización* cuya función es exponer las imágenes decodificadas y procesadas. Esta ventana tiene la interfaz más sencilla de la aplicación dado que es necesario dar importancia a la imagen obtenida, localizada en el centro de la pantalla.

En la Figura A.9 se ilustra la ventana *Visualización*, con una de las imágenes de prueba. Por otro lado, una vez visualizado el resultado del procesado de la señal, el usuario puede almacenar la imagen mediante el botón *Save Image*. De forma predeterminada, la imagen se guarda en formato *png*.

## APÉNDICE A. MANUAL DE USUARIO

---

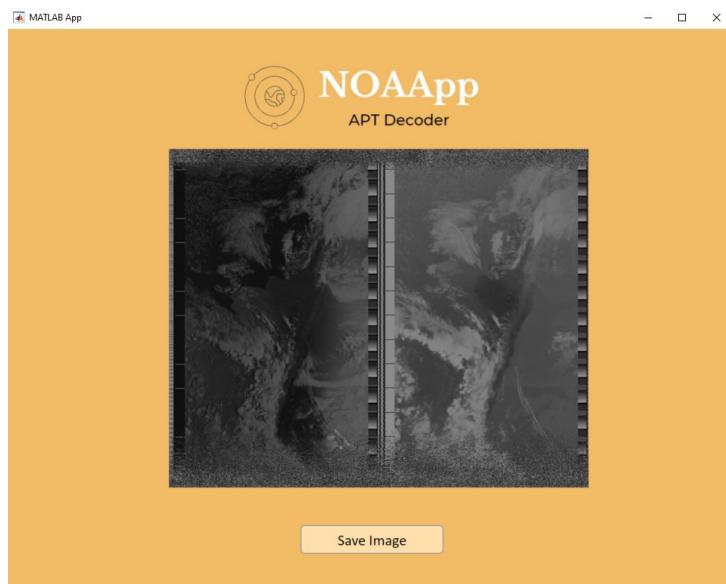


Figura A.9: Interfaz de la ventana Visualización.

## Apéndice B

# Presupuesto de la implementación

En este capítulo se realiza el presupuesto de la implementación de la estación receptora de la señal APT realizada en este proyecto. Por un lado, se analizan los costes del diseño y construcción de la antena elegida para este proyecto. En este caso, es necesario tener en cuenta los costes asociados al software utilizado para la simulación y el diseño de la estructura de la antena, además de los materiales y elementos utilizados. Por otro lado, se presentan los costes para el desarrollo del software de procesado de las imágenes meteorológicas, en el que se incluyen el presupuesto de la mano de obra necesaria y las licencias de diferentes programas.

### B.1. Materiales y elementos para la estructura de la antena

Componente	Nº de unidades	Precio unitario (€)	Subtotal (€)
Coaxial RG-58	7 m	0.6	4.2
Mástil PVC	2 m	1.85	3.69
Tubo PVC	2.4 m	0.4	0.95
Clemas	12	0.12	1.39
<b>TOTAL</b>			10.23

Tabla B.1: Costes de los materiales para la implementación de la antena QFH.

## B.2. Herramientas para la implementación de la estructura de la antena

Componente	Nº de unidades	Precio unitario (€)	Subtotal (€)
Soldador	1	8.49	8.49
Estaño	50 g	12.99	12.99
<b>TOTAL</b>			21.48

Tabla B.2: Costes de las herramientas utilizadas en la construcción de la antena QFH.

## B.3. Implementación en 3 dimensiones de la estructura

Componente	Nº de unidades	Precio unitario (€)	Subtotal (€)
Impresión 3D de la estructura	1	134.59	134.59
<b>TOTAL</b>			134.59

Tabla B.3: Costes de la implementación de la estructura de la antena QFH en 3 dimensiones.

## B.4. Software para el diseño de la antena y el procesado de la señal APT

Concepto	Nº de unidades	Precio unitario	Subtotal (€)
Windows 10	1	259 €	259
Matlab	1	0.09 €/hora	4.11 (45h)
AutoCad	1	0.4 €/hora	4 (10h)
Altair Feko	1	5.48 €/hora	109.6 (20h)
<b>TOTAL</b>			376.71

Tabla B.4: Costes del software utilizado en la recepción y decodificación de la señal APT.

## APÉNDICE B. PRESUPUESTO DE LA IMPLEMENTACIÓN

---

### B.5. Dispositivos para la recepción y el procesado de la señal

Componente	Nº de unidades	Precio unitario (€)	Subtotal (€)
Receptor SDR Nooelec	1	27.48	27.48
Receptor <i>Walkie Talkie</i>	1	35.03	35.03
Analizador de redes	1	75 €/hora	225 (3h)
Ordenador portátil	1	899.01	899.01
<b>TOTAL</b>			1336.52

Tabla B.5: Costes de los dispositivos utilizados en la recepción de la señal APT.

### B.6. Recursos humanos

Concepto	Nº de horas <sup>1</sup>	Precio unitario (€/h)	Subtotal (€)
Diseño y simulación de la estructura	30	22	660
Construcción de la estructura	10	22	220
Caracterización y pruebas de medida	3	22	66
Procesado de la imagen	45	22	990
<b>TOTAL</b>			1936

Tabla B.6: Costes de la mano de obra para la realización de la estación receptora.

---

<sup>1</sup>En este apartado no se han tenido en cuenta las horas dedicadas a la realización de un estudio previo y el desarrollo de la memoria del proyecto. En conjunto, se completan las 120 h del TFG.

## B.7. Resumen de costes

<b>Concepto</b>	<b>Subtotal (€)</b>
Implementación de la antena QFH	10.23
Herramientas utilizadas en la construcción	21.48
Implementación de la estructura 3D	134.59
Software utilizado en la recepción y decodificación	376.71
Dispositivos utilizados en la recepción	1336.52
Mano de obra	1936
<b>Presupuesto total de material</b>	<b>3815.53</b>
Gastos generales (13 %)	496.02
Beneficio industrial (6 %)	228.93
Total sin IVA	4540.48
IVA (21 %)	953.5
<b>Presupuesto total implementación por contrata</b>	<b>5493.98</b>

Tabla B.7: Resumen de costes.

## **Apéndice C**

# **Hoja de características de los componentes utilizados**

A continuación, se presentan las hojas con las características técnicas de los componentes utilizados en la estación receptora de este proyecto, con el fin de aportar la información necesaria para el uso de los componentes.

- Cable coaxial RG-58.

# RG58 Coaxial Cable

pro-POWER



RoHS  
Compliant

## Product Description:

Application	For communication and signal control systems
Multi-construction	1

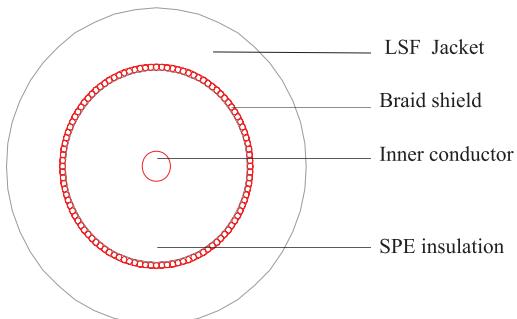
## Cable Construction:

Conductor	Tinned Copper
1 Singles	
Construction	T0.18 ± 0.008 × 19
Standard Dia.(mm)	0.9
Insulation Layer	Solid PE
Thickness (mm)	1.03
Insulation Dia.(±0.15mm)	2.95
Insulation Colour	Natural
Braiding Layer	Tinned Copper
Construction (Standard)	T0.12 ± 0.008 × 112
Braiding Coverage	94%
Jacket	LSZH
Thickness (mm)	0.65
Dia.(±0.15mm)	4.95
Jacket Colour	Black
Packaging	100m/Cardboard Reel

## Electrical Characteristics:

Max. Conductor DC Resistance at 20°C (Ω/km)	39.2
Min. Insulation DC Resistance at 20°C (MΩ × km)	>500
Operating Temperature Range	-30°C to +80°C
Rated Voltage(V)	1,900V RMS
Capacitance (pF/m)	100 ± 5
Velocity Ratio (%)	66
Impedance (Ω)	50 ± 3
Attenuation at 20°C (dB/100m) (±8%)	
100MHz	21
200 MHz	31
1,000MHz	76
Flame Retardancy	IEC 60332-1, UL VW-1

## Design:



## Part Number Table

Description	Part Number
Coaxial Cable, RG58, Black, 100m	PP000627

**Important Notice :** This data sheet and its contents (the "Information") belong to the members of the Premier Farnell group of companies (the "Group") or are licensed to it. No licence is granted for the use of it other than for information purposes in connection with the products to which it relates. No licence of any intellectual property rights is granted. The Information is subject to change without notice and replaces all data sheets previously supplied. The Information supplied is believed to be accurate but the Group assumes no responsibility for its accuracy or completeness, any error or omission from it or for any use made of it. Users of this data sheet should check for themselves the Information and the suitability of the products for their purpose and not make any assumptions based on information included or omitted. Liability for loss or damage resulting from any reliance on the Information or use of it (including liability resulting from negligence or where the Group was aware of the possibility of such loss or damage arising) is excluded. This will not operate to limit or restrict the Group's liability for death or personal injury resulting from its negligence. pro-POWER is the registered trademark of the Group. © Premier Farnell plc 2012.