



eetac

Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

TÍTULO DEL TFG: Estación de tierra autónoma para la recepción de imágenes de satélites NOAA

TITULACIÓN: Ingeniería de Sistemas Aeroespaciales

AUTOR: David Pulido Serrano

DIRECTOR: Gabriel Montoro López

FECHA: 7 de Septiembre de 2021

Título: Estación de tierra autónoma para la recepción de imágenes de satélites NOAA.

Autor: David Pulido Serrano

Director: Gabriel Montoro López

Fecha: 7 de Septiembre de 2021

Resumen

Los satélites meteorológicos de órbita polar representan una de las principales fuentes de información ambiental sobre la Tierra y la atmósfera, al ser capaces de analizar todo el globo. Los de este tipo que son gestionados por agencia estadounidense NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), transmiten de imágenes de la Tierra en directo vía radio a medida que orbitan, las cuales que pueden ser recibidas por usuarios en Tierra.

Este proyecto se centrará en la recepción de estas imágenes, desarrollando un prototipo de estación de Tierra que sea capaz de realizar esta función (entre otras), detallando todo el proceso.

Los puntos principales son:

-La investigación de la historia de los satélites meteorológicos de órbita polar de la NOAA y la evolución a lo largo de los años en sus sistemas para captar imágenes de la atmósfera y de la Tierra, así como el futuro de estos.

-La descripción del proceso completo desde que se capta la imagen por los sistemas del satélite hasta que se decodifica mediante una estación receptora en tierra.

-El diseño y construcción de una antena que consiga recibir de forma eficaz las señales transmitidas por los satélites meteorológicos, donde estará contenida la imagen.

-El diseño y construcción de una estación de tierra que sea capaz de recibir, decodificar y almacenar de forma autónoma las imágenes transmitidas por los satélites en sus pasadas, sin la intervención de una persona y pudiéndose desplegar en cualquier lugar, además de tener un coste y consumo reducido.

Title: Autonomous ground station for receiving NOAA satellite images.

Author: David Pulido Serrano

Director: Gabriel Montoro López

Date: September 7th 2021

Overview

Polar meteorological satellites are one of the main environmental information sources about Earth and atmosphere, being capable to scan the entire globe. The ones of this type managed by the U.S. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) administration transmit live images of Earth via radio, which can be received by users on Earth.

This project will focus on the reception of these images, developing a prototype of a ground station capable of performing this task, detailing all the process.

The main subjects are:

- The research of the history about polar meteorological satellites of NOAA and the evolution in time in the systems for getting images of the atmosphere and Earth, as well as the future of those.
- The description of the process: since the image is taken by the satellite equipment, till it is received and decoded by a ground station.
- The design and making of an antenna for receiving effectively the signal transmitted by these meteorological satellites, where the image is contained.
- The design and making of a ground station capable of receiving, decoding and storing autonomously the images transmitted by the satellites in its passes. Everything without the operation of a person and being able to be deployed anywhere, having also a low cost and low energy consumption.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. SATÉLITES METEOROLÓGICOS DE ÓRBITA POLAR	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Historia de los satélites meteorológicos polares de Estados Unidos	2
1.2.1. Primera generación: Serie TIROS (1960 - 1966).....	2
1.2.2. Segunda generación: Serie TOS (1966 – 1969).....	4
1.2.3. Tercera Generación: Serie ITOS (1970 – 1976).....	5
1.2.4. Cuarta Generación: Serie ATN (1978 – 1994).....	6
1.2.5. Quinta Generación: Serie NOAA-POES (1998 - 2009).....	7
1.3. Futuro de los satélites meteorológicos	9
1.3.1. JPSS-1 NOAA-20 (2017).....	9
1.3.2. JPSS-2 (2022)	9
CAPÍTULO 2. RECEPCIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITES NOAA	10
2.1 Transmisión de imágenes.....	10
2.1.1 Modos APT	10
2.2 Recepción de imágenes de los NOAA 15, 18 y 19 en el modo APT.	13
2.2.1 Seguimiento de satélites.....	13
2.2.2 Equipamiento receptor necesario	14
2.2.3 <i>Software</i> de procesado de la señal.....	16
CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA PARA LA RECEPCIÓN DE SEÑALES DE SATÉLITES NOAA	17
3.1 Tipos de antenas para la recepción de imágenes de satélites NOAA.	17
3.1.1 Dipolo en “V”.....	17
3.1.2 Dipolo Cruzado o <i>Turnstile</i>	18
3.1.3 Antena de hélice cuadrifilar o QFH (Quadrifilar Helix)	20
3.2 Diseño, construcción y de una antena tipo <i>Turnstile</i> para 137,5 MHz.....	20
3.2.1 Diseño preliminar	20
3.2.2 Construcción de los dipolos	21
3.2.3 Ajuste a la frecuencia de resonancia	23
3.2.4 Cableado de la antena.....	27
3.2.5 Construcción del reflector y ajuste	32
3.2.6 Ensamblado final	36
3.3 Prueba de la antena implementada.....	38
3.3.1 Prueba de recepción de señales de satélites NOAA.	38
3.4 Instalación de la antena	41
3.4.1 Cableado Antena-Receptor	41
3.4.2 Instalación de la Antena.....	43
CAPÍTULO 4. ESTACIÓN DE TIERRA AUTÓNOMA RECEPTORA	44
4.1 Características necesarias en la estación de tierra.....	44

4.2	Componentes necesarios e implementación	44
4.2.1	Ordenador.....	44
4.2.2	Receptor SDR.....	44
4.2.3	Reloj horario externo.....	45
4.2.4	Conexión y alimentación.....	46
4.2.5	Caja estanca	47
4.3	Scripts	51
4.4	Operación local y remota	51
4.5	Esquema de funcionamiento de la estación y software	53
4.6	Despliegue	53
4.7	Desempeño de la estación	54
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES		55
CAPÍTULO 6. REFERENCIAS		56
ACRÓNIMOS		57
CAPÍTULO 7. ANEXOS		58
A.1.	Características del cable RG-223 y RG-59.....	58
A.2.	Calibración de un Analizador de Redes	59
A.3.	Modificaciones módulo RTC DS1307.....	60
A.4.	Scripts Raspberry estación de tierra	63
A.5	Galería de Imágenes recibidas. DANA 1 de Septiembre de 2021.	66

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de este proyecto es la implementación de una estación de tierra que sea capaz de recibir de forma autónoma las imágenes de los satélites NOAA operativos.

Estos satélites captan imágenes de la Tierra y de la atmósfera tanto en espectro visible como en infrarrojo a medida que orbitan. Las imágenes se transmiten a tierra a una frecuencia de 137 MHz en FM, mediante un protocolo sencillo llamado APT. Pueden ser recibidas mediante receptores que cubran esa banda y decodificadas mediante el *software* adecuado en un ordenador.

Últimamente se han popularizado los receptores RTL-SDR que se conectan al puerto USB de un ordenador y que permiten recibir una gran variedad de señales de una forma muy económica. Estos son muy usados, entre otros, para la recepción de las señales de satélites NOAA, pues el único equipamiento requerido es: un ordenador, una antena adecuada para la frecuencia a la que se quiere recibir y uno de estos receptores. Fue la experimentación de lo anterior, lo que ha inspirado la realización de este proyecto, buscando profundizar más en esta temática, y aplicando los conocimientos aprendidos tanto dentro del grado, como por afición propia. Para llevar más allá lo experimentado se decidió que todo este proceso de recepción de imágenes que requería la intervención de una persona para controlar los diferentes *software*, se automatizaría; y que el ordenador portátil (con el receptor RTL-SDR USB conectado) que lo controlaba, pasaría a ser una Raspberry PI, con el objetivo de poder meterlo todo en una pequeña caja transportable. Lo único que quedaría fuera de la caja sería la antena, de la que se construiría un modelo más elaborado y adecuado a la señal del NOAA.

La distribución del proyecto es la siguiente:

En el primer capítulo se describen los satélites polares y la historia de las series de satélites meteorológicos de órbita polar de Estados Unidos, desde los años 60 hasta hoy; así como el equipamiento que utilizan para captar la información y cómo la envían a la tierra.

El segundo capítulo trata sobre la recepción de imágenes de satélites meteorológicos, describiendo los protocolos y modos de transmisión, así como el equipamiento en tierra y *software* necesarios para su seguimiento y recepción de su señal.

En el tercer capítulo se definen los tipos de antenas que se utilizan para la recepción de imágenes, y se implementa un diseño de antena de dipolo cruzado o *Turnstile*.

En el cuarto capítulo se describe el proceso de diseño, construcción y funcionamiento de la estación de tierra para recibir imágenes de satélites NOAA de forma autónoma y se implementa en la práctica. Obteniendo una serie de resultados, en forma de imágenes de un fenómeno meteorológico real reciente.

CAPÍTULO 1. SATÉLITES METEOROLÓGICOS DE ÓRBITA POLAR

1.1. Introducción

Los satélites de órbita polar se caracterizan por la órbita que describen, la cual pasa por ambos polos o cerca de ellos. Los satélites polares van barriendo la Tierra a medida que estos orbitan de norte a sur (y viceversa) y esta gira, por lo que pueden llegar a “ver” cualquier lugar de la tierra. Las altitudes típicas de los satélites polares rondan los 800 km, lo que resulta en un periodo orbital de unos 100 minutos.

Este tipo de satélite se utiliza principalmente para: meteorología y estudio de la superficie de la Tierra (control de vegetación, nieve, monitorización temperaturas, etc), espionaje y telecomunicaciones.



Fig. 1.1: Un satélite de órbita polar proporciona una cobertura global

Los satélites polares muchas veces se encuentran en una órbita polar sol-síncrona o helio-síncrona. Se caracteriza en que el satélite pasará por una zona geográfica determinada a la misma hora solar. En los satélites meteorológicos se utiliza este tipo de órbita para tener, sobre una misma zona, una información climática para el día y una para la noche.

En cuanto a satélites meteorológicos de órbita polar, encontramos las siguientes series: los NOAA-POES (Polar Operational Environmental Satellite) de Estados Unidos, los Meteop (Europa), los FY-3 (China) y los Meteor (Rusia).

1.2. Historia de los satélites meteorológicos polares de Estados Unidos

1.2.1. Primera generación: Serie TIROS (1960 - 1966).

Hace 61 años, el 1 de Abril de 1960, se lanzó el primer satélite meteorológico que logró captar con éxito imágenes de la Tierra desde el espacio (Fig.1.2), para posteriormente transmitir las por radio hacia las estaciones de Tierra.

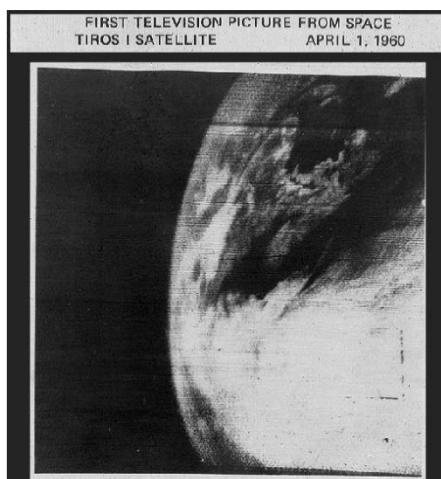


Fig. 1.2: Primera imagen de la tierra obtenida desde el satélite TIROS-1.

TIROS-1 (Television Infrared Observation Satellite) fue el pionero de una generación de satélites que permitían estudiar (a partir de ese momento también desde el espacio) los fenómenos meteorológicos que afectan a la Tierra.

Este satélite con forma de prisma de 18 lados (Fig.1.3), 107 cm de diámetro y 56 cm de alto, cubierto de células fotovoltaicas, con una masa de 122kg y estabilizado por spin, estuvo en órbita a una altitud de unos 650 km. Durante los 78 días que estuvo en servicio, llegó a transmitir más de 19.000 imágenes.

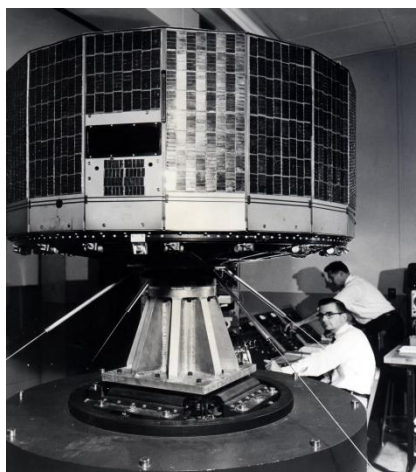


Fig. 1.3: Satélite TIROS-1 siendo sometido a pruebas de vibración

Para tomar las imágenes estaba equipado con dos cámaras de televisión: una de gran angular para captar una gran superficie, y otra con un ángulo más estrecho que abarcaba un área más pequeña, permitiendo un detalle superior. Las imágenes en blanco y negro se tomaban con una cadencia de dos segundos y solo cuando había luz solar en la superficie terrestre, ya que las cámaras solo podían captar el espectro de luz visible (pese a incluir el satélite la palabra “infrarrojo” en su nombre). Esta cadencia de disparo permitía cierto solape entre imágenes para poder crear una secuencia continua de imágenes de las áreas sobre las que pasaba el satélite. Las imágenes podían ser almacenadas en el propio satélite en cintas magnéticas, para posteriormente ser transmitidas hacia la Tierra cuando se encontrase cerca de las estaciones receptoras.

Debe tenerse en cuenta que al ser un satélite estabilizado por spin (a 12 RPM), la mayoría del tiempo, el satélite y las cámaras no se encontraban apuntando hacia la Tierra (Fig.1.4).

Las imágenes y los datos de telemetría eran transmitidos a la Tierra vía radio, con un enlace de bajada de 235 MHz en FM, usando una antena de polarización circular de dipolo cruzado o *Turnstile* situado en la parte inferior del satélite (Fig.1.4). También podía recibir comandos enviados desde la Tierra mediante una antena de monopolo situada en la parte superior.

Respecto a las estaciones en tierra encargadas de recibir estos datos, se encontraban repartidas por el territorio estadounidense.

El satélite también contaba con unas radiobalizas, que permitían la localización y seguimiento del mismo, gracias a estaciones receptoras repartidas a lo largo del continente americano.[1][2]

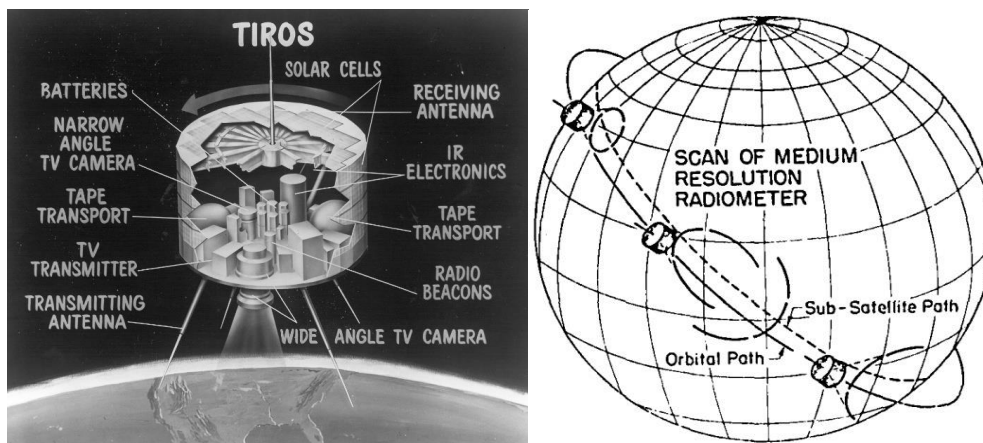


Fig. 1.4: Ilustración del satélite TIROS-1 y sus componentes.

A partir del TIROS-2, lanzado el 23 de Noviembre de 1960, con una masa de 127kg, además de las cámaras de espectro visible, se empezaron a equipar radiómetros que permitían escanear el espectro infrarrojo o IR. Esto permitía tomar imágenes nocturnas y también analizar la distribución del calor en la superficie de la tierra y en la atmósfera.

Con el TIROS-8, lanzado el 21 de Diciembre de 1963, con una masa de 256kg, comenzó el servicio de difusión de imágenes mediante el modo de transmisión APT (Automatic Picture Transmission), el cual permitía recibir imágenes desde cualquier lugar del mundo sobre el que pasase el satélite, con estaciones de tierra simples y baratas. Esto permitió el aprovechamiento de los datos por meteorólogos de todo el planeta [1] , [3].

Este modo de transmisión en la banda de VHF, se sigue usando en la actualidad para la difusión de imágenes desde los satélites operativos: NOAA 15, 18, y 19. Más adelante se explicará en detalle el modo APT.

1.2.2. Segunda generación: Serie TOS (1966 – 1969).

Los primeros satélites de la serie TOS (TIROS Operational System), finalmente llamados satélites ESSA-1 y ESSA-2 (Environmental Science Services Administration), fueron lanzados en Febrero del año 1966, siendo los primeros en trabajar conjuntamente en la misma órbita polar sol-síncrona (Fig.1.5) a

1400km de altitud. Tenían una masa de 304 kg y un diseño muy similar al de la serie TIROS anterior. Uno de los satélites obtenía imágenes diurnas mientras el otro estaba captando imágenes nocturnas. [1], [3]



Fig. 1.5: Ilustración de dos satélites de órbita polar sol-síncrona trabajando conjuntamente.

1.2.3. Tercera Generación: Serie ITOS (1970 – 1976).

La serie de satélites ITOS (Improved Tiros Operational System), finalmente con la designación NOAA (debido a la fundación de la administración el 3 de Octubre de 1970), comenzó con el NOAA-1, lanzado el 11 de Diciembre de 1970, con una masa de 307kg. En este satélite, además de la nueva designación, se indujeron cambios importantes. El más visual es que se dejó de utilizar el chasis característico con forma de prisma de 18 caras que se utilizaba desde el TIROS-1, pasando a uno de forma prácticamente cúbica (1m por 1m por 1,2 m) (Fig.1.6). La estabilización del satélite dejaba de ser por spin, pasándose a usar una estabilización de 3 ejes, basada en ruedas de momento acopladas a motores eléctricos, lo que permitía poder tener una mejor maniobrabilidad y un control preciso de la actitud del satélite. Esto se traducía en la capacidad de obtener mejores imágenes y durante más tiempo.

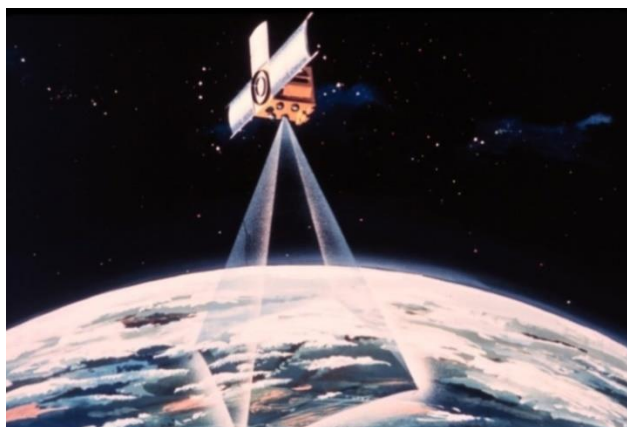


Fig. 1.6: Ilustración del NOAA-1, se puede apreciar el gran cambio en el diseño del satélite.

A partir del NOAA-2, lanzado el 15 de Octubre de 1972, se equipó el sensor VHRR (Very High Resolution Radiometer), lo que permitió obtener con precisión datos de la temperatura de la superficie de la tierra, de la parte superior de las nubes y por primera vez, de la superficie de mares y océanos, todo ello tanto de día como de noche.

A partir de este satélite también se dejaron de equipar cámaras de televisión convencionales. Las imágenes en luz visible (junto con las IR) se tomarían con radiómetros, que demostraban ser más indicados para la observación, además de resultar más robustos y fiables en el ambiente espacial [1], [3].

2.1.1.1. El sensor VHRR

El VHRR consta de dos radiómetros (2 canales): uno detecta la radiación en luz visible de 0,6 a 0,7 μm , y el otro la radiación IR de 10,5 a 12,5 μm .

El proceso de escaneo (Fig.1.7) sucede de manera continua a medida que el satélite orbita. El detector del radiómetro apunta hacia del eje de un motor, pero antes se encuentra un espejo fijado de forma oblicua al eje, de tal manera que al girar el motor, el espejo al que apunta el radiómetro, oscila. Esta oscilación hace que exista un barrido de 360° perpendicular al eje del motor, del que seleccionará un arco: este arco determinará el ancho de la imagen de la tierra que es capaz de captar. Esta operación de escaneo se repite continuamente, tantas veces como revoluciones gire el motor. En el caso del NOAA-2, gira 400 rpm, que serán 400 escaneos por minuto. A este tipo de escaneo se le conoce con el nombre de *cross track scanning*, ya que es perpendicular a la trayectoria del satélite [4].

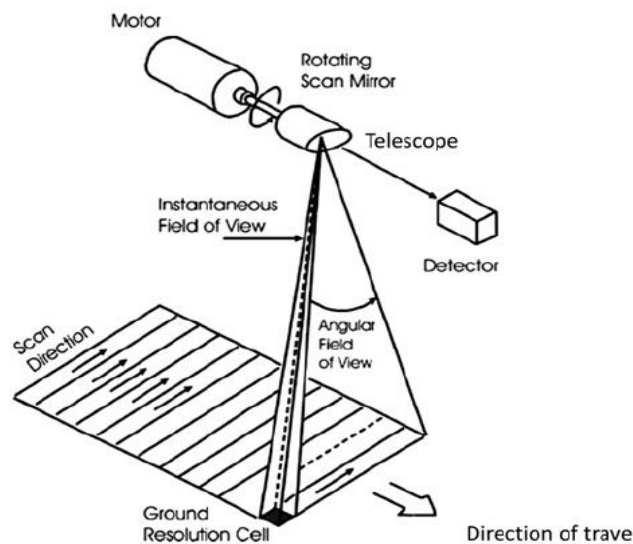


Fig. 1.7: Ilustración del funcionamiento del *cross track scanning*.

1.2.4. Cuarta Generación: Serie ATN (1978 – 1994).

En la serie ATN (Advanced TIROS-N) encontramos el TIROS-N, lanzado el 13 de Octubre de 1978, con una masa de 589kg. Empezó a equipar el sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), que como su nombre indica, es una evolución del VHRR. El sensor estaba compuesto de cuatro radiómetros (4 canales) (Fig.1.9):

- Canal 1: Luz visible, de 0,55 a 0,9 μm . Usado para mapeo del terreno y nubes durante el día.

- **Canal 2:** Infrarrojo Cercano, de 0,725 a 1,1 μm . Mapeo de agua en superficie y de vegetación.
- **Canal 3:** Infrarrojo ventana atmosférica, de 3,55 a 3,93 μm . Temperatura de la superficie del mar SST y detección de fuego.
- **Canal 4:** Infrarrojo ventana atmosférica, de 10,5 a 11,5 μm . Temperatura de la superficie del mar y mapeo de nubes por la noche.

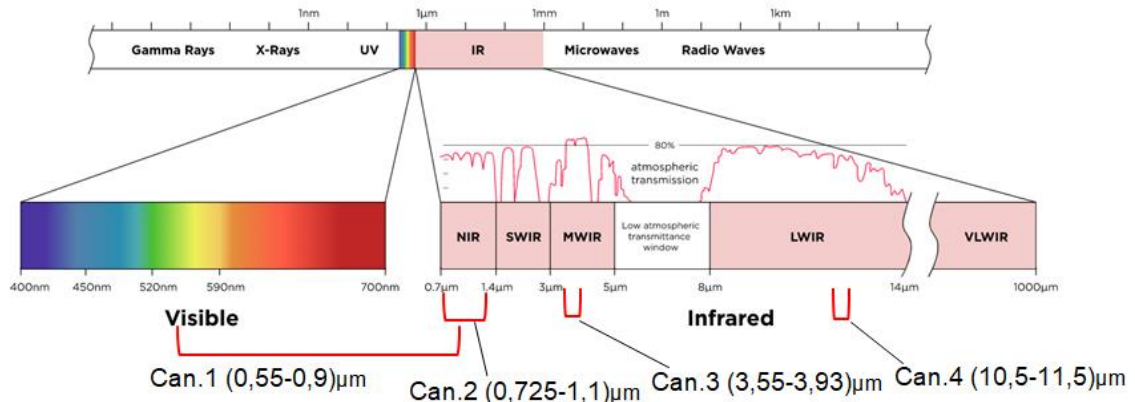


Fig. 1.8: Espectros visible y electromagnético y detalle de los canales del AVHRR/1.

Otra capacidad que se tiene con este sensor es la de monitorizar con precisión la temperatura de la superficie del mar o SST (Sea Surface Temperature). Esto permite obtener la cantidad de calor en los océanos, lo que entre otros, ayuda a predecir fenómenos meteorológicos como ciclones y tormentas tropicales, además de poder monitorizar el aumento de temperatura generalizada en los océanos debida al calentamiento global.

El NOAA-7, lanzado el 23 de Junio de 1981, con una masa de 589kg, fue el primero en equipar el sensor AVHRR/2. Este era una evolución del AVHRR (o AVHRR/1), incluía un quinto canal infrarrojo que iba de los 11,5 a 12,5 μm (por encima del cuarto canal).[1], [3], [4].

1.2.5. Quinta Generación: Serie NOAA-POES (1998 - 2009)

El primero de la quinta generación fue el NOAA-15, fue lanzado el 13 de mayo de 1998 y todavía se encuentra en servicio. Tiene una masa de 1457kg y se encuentra en una órbita sol-síncrona a una altitud de 870 km. Equipa el sensor AVHRR/3, que incluye un canal infrarrojo extra (respecto el AVHRR/2) denominado 3A de 1,58 a 1,64 μm (el antiguo canal 3 pasa a llamarse 3B), lo que significa que ahora tiene 6 canales.



Fig. 1.9: Satélite de quinta generación en su forma “más compacta” sobre un soporte basculante.

El NOAA-15 ha superado con creces el tiempo estimado de su misión (de entre 2 a 5 años para esta clase de satélites), al llevar ya 23 años en servicio. No obstante, algunos de los sensores y/o sistemas han perdido capacidades o se encuentran fuera de servicio. A destacar, el fallo intermitente en el motor que hace girar el espejo de escaneo del AHRR: desde el año 2002 se han producido algunos episodios de picos de corriente en el motor que provocan imágenes corruptas (Fig.1.10).

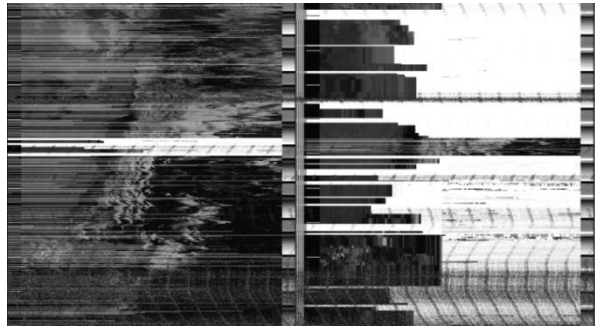


Fig. 1.10: Imágenes APT corruptas del NOAA-15 recibidas por un aficionado durante un episodio de problemas en el motor del AVHRR.

El satélite NOAA-18, lanzado el 20 de mayo de 2005, con una instrumentación y características (peso, órbita, etc.) similares a las del al NOAA-15. Todavía continúa en servicio a día de hoy.

El satélite NOAA-19, lanzado el 6 de febrero de 2009, con una instrumentación y características (peso, órbita, etc.) similares a las de sus predecesores de la serie. Es el último satélite de la quinta generación y continúa en servicio a día de hoy. [1], [3], [5]



Fig. 1.11: Ilustración de un satélite de quinta generación.

1.3. Futuro de los satélites meteorológicos

1.3.1. JPSS-1 NOAA-20 (2017)

El JPSS-1 (Joint Polar Satellite System-1) o NOAA-20, fue lanzado el 18 de Noviembre de 2017, siendo el primero de los satélites meteorológicos polares de nueva generación. Orbita a una altitud de 830km y tiene una masa de 1929 kg.

Este satélite equipa el nuevo sensor VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) que permite escanear la atmósfera, la Tierra y la superficie de los océanos gracias a sus 22 canales que dan una cobertura desde una longitud de onda desde los 0,402 μm hasta los 12,45 μm .

Este nuevo satélite deja de dar servicio imágenes por APT, en su lugar se utiliza un modo de transmisión digital llamado HRD (High Rate Data) para enviar las imágenes, este se transmite en la banda de SHF (Super High Frequency) a 7,812 GHz en polarización circular. Para recibir estas imágenes de este modo es necesario un equipamiento más complejo y caro que con APT, pero la definición de las imágenes es mucho mayor.

El JPSS-1 tendrá una vida operacional de 7 años y hasta el momento todos los sistemas del satélite funcionan correctamente.[1], [6]

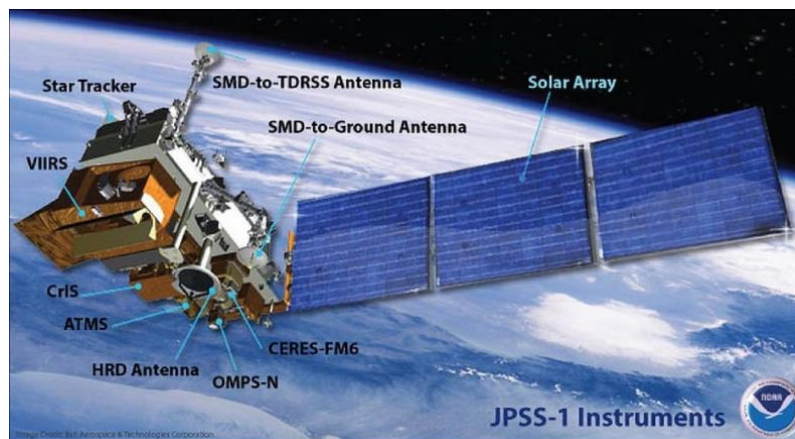


Fig. 1.12: Ilustración del NOAA-20 con detalle de sus instrumentos.

1.3.2. JPSS-2 (2022)

El JPSS-2 está previsto que sea lanzado en Septiembre de 2022. Complementará al JPSS-1 en su misma órbita y llevará una instrumentación similar a la de este.[7]

CAPÍTULO 2. RECEPCIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITES NOAA

2.1 Transmisión de imágenes

2.1.1 Modo APT

El modo de transmisión APT tiene su origen en el año 1963, cuando se implementó por primera vez en el satélite TIROS-8.

Este se basa en que a medida que el satélite va orbitando y escanea la superficie de la tierra y la atmósfera con los radiómetros, va transmitiendo hacia la Tierra de forma constante, las líneas de la imagen resultante de este escaneo.

La imagen tiene un ancho limitado por el ángulo de vista del AVHRR (entorno a unos 2500km) (Fig.2.1). El vertical es indefinido, ya que como el escaneo es continuo a medida que orbita, estará limitado por la línea de vista del receptor con el satélite para poder recibir la señal, con un tiempo de línea de vista grande (debido a ausencia de montañas, edificios u otros objetos alrededor) se pueden obtener imágenes que capten de unos 7000km de alto. La resolución del modo APT es de 4 km/píxel.

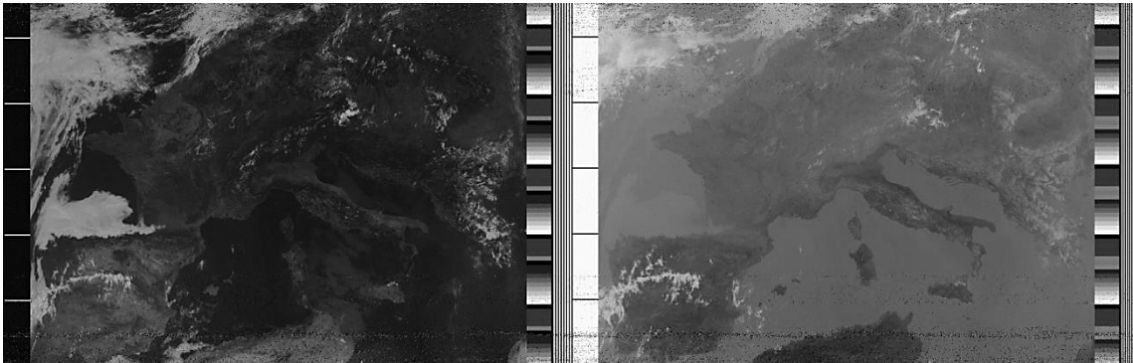


Fig. 2.1: Ejemplo de imagen recibida del modo APT.

El formato APT ofrece cobertura global, pues las imágenes pueden ser recibidas en cualquier lugar del mundo mientras esté siendo sobrevolado por uno de los tres NOAA-POES operativos.

El flujo de datos transmitido del formato APT se produce modulando en amplitud una subportadora de 2400Hz con los 8 bits (256 niveles) más significativos de los 10 bits de datos del AVHRR. Esto resulta en un flujo analógico, variando en amplitud en función del flujo de datos del AVHRR.

Una mayor profundidad de modulación en la subportadora, corresponde con el color blanco en la imagen, y una menor profundidad de modulación con el color negro (entre medio estarán los diferentes tonos de gris).

Esta subportadora se modula en frecuencia sobre una portadora de 137Mhz.

La señal resultante será una señal a 137MHz, FM, con un ancho de banda de 34KHz.

La potencia de transmisión del satélite es de 5W y para radiarla utiliza una antena direccional de tipo hélice cuadrifilar o QFH (Quadrifilar Helix)

generando una señal de polarización circular derecha, a esta antena en el satélite se la denomina como VRA (VHF Real-time Antenna).

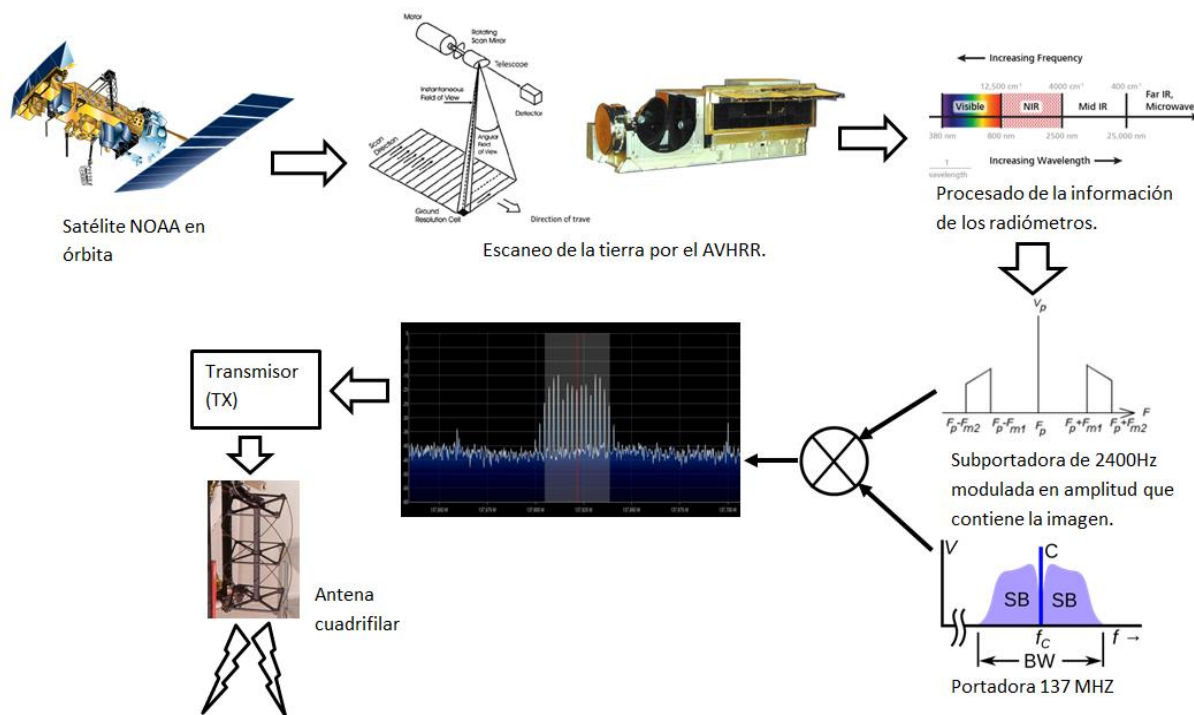


Fig. 2.2: Esquema de obtención de la imagen por el satélite y transmisión de la misma.

El modo APT transmite con una cadencia de 120 líneas por minuto, es decir, una línea cada 0,5s (500ms). El espejo del AVHRR gira a 360 RPM así que en realidad con APT se envía un tercio de la información captada (120líneas/min). De estos 500 ms, 250 ms pertenecen a un canal A y 250 un canal B. De los 250ms de cada canal, la mayoría corresponderán a la imagen y una menor porción a los elementos del protocolo (sincronía, telemetría y escaneo al vacío) (FIG.2.3).

La pasada de un satélite NOAA tiene una duración de 10 a 15 minutos. Los tres satélites NOAA activos transmiten las imágenes por el modo APT en las siguientes frecuencias:

- NOAA-15: 137,62 MHz.
- NOAA-18: 137,9125 MHz.
- NOAA-19: 137,1 MHz.

2.1.1.1 Ejemplo de transmisión en el modo APT

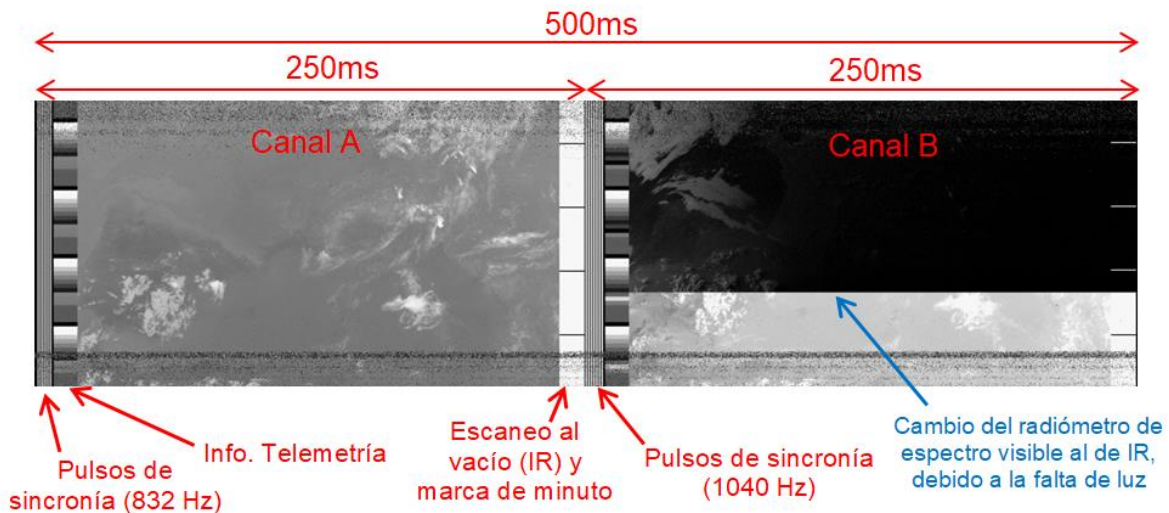


Fig. 2.3: Ejemplo de las diferentes partes del modo APT.

- Canal A:**
 La transmisión en APT comienza con un tren de 7 pulsos de sincronía a 832Hz, estos se ven como 7 barras verticales negras y blancas. Estos sirven para que el programa de decodificado lo identifique como el principio de la transmisión de la imagen en IR. Justo después hay una zona dedicada a información de telemetría del sensor, que se utiliza para calibrar la temperatura en la imagen. En la imagen aparecen como una serie de 16 bandas horizontales de color negro, blanco o gris. Inmediatamente después, encontramos la imagen de la tierra captada por el radiómetro de IR (canal 4 del AVHRR/3: 10,5 a 11,5 μ m). Las zonas frías como las nubes se verán de color blanquecino y las zonas calientes se verán de color gris. Seguidamente el radiómetro IR escanea momentáneamente el vacío del espacio, que al tener una temperatura muy baja se verá como una banda de color blanco. Cada 60 segundos aparecerá una línea de color negro como marcador de minuto.
- Canal B:**
 Después de la transmisión de la imagen IR, comienza la transmisión de la imagen en espectro visible. Comienza con un tren de 7 pulsos de sincronía de 1040Hz que se verán como 7 barras verticales blancas y negras. Seguidamente se encuentra la zona dedicada a la telemetría, como en el canal A pero con diferentes valores. A continuación, se encontrará la imagen tomada en espectro visible (rojo e infrarrojo cercano) (canal 2 del AVHRR/3: 0,725 a 1,1 μ m), la iluminación en la imagen provendrá de la luz del sol reflejada por la superficie de la tierra, las nubes y el mar, por lo que se podrán distinguir con facilidad. Si es de noche el satélite conmutará a IR (canal 3 del AVHRR/3: 3,55 a 3,93 μ m), ya que en espectro visible solo se vería una imagen de color negro.

Por último el radiómetro hace un escaneo del espacio profundo, lo que resulta en una banda negra (ya que el espacio profundo es de color negro) y como antes, tendremos una marca de minuto, aunque esta vez de color blanco. Cuando pase a IR durante la noche, esta banda pasará a ser negra como en el canal A.

Canal A y B a veces pueden aparecer cambiados de orden debido al *software* de decodificado.[4]

2.2 Recepción de imágenes de los NOAA 15, 18 y 19 en el modo APT.

2.2.1 Seguimiento de satélites

Para poder recibir la señal de los satélites es conveniente saber cuándo van a pasar por la zona.

Para ello existen *softwares* de seguimiento de satélites, que permiten estimar el momento o momentos del día en que el satélite o satélites de interés comenzarán a elevarse por nuestro horizonte, así como el momento en que se volverán a esconder, para únicamente tener que capturar información durante este intervalo de tiempo.

Este tipo de *software* suele tomar como referencia un archivo .TLE (Two-Line Element set) y las coordenadas del observador en la tierra.

Los archivos TLE se suelen generar mediante monitorización de la posición de los satélites por parte de organizaciones gubernamentales, por ejemplo: la Fuerza Aérea de Estados Unidos publica archivos TLE sobre más de 12.000 satélites de interés público, que pueden obtenerse en servidores online o en páginas web como *celestrak.com*.

Un archivo TLE contiene información orbital del satélite en un momento concreto y que permite realizar predicciones de la posición del mismo. Su estructura es la siguiente (Fig.2.4):

- Primera línea (línea 0) del TLE: suele contener el indicativo del satélite, aunque no es obligatorio.
- Segunda línea (línea 1): contiene información *descriptiva* del satélite: número de serie, si es clasificado o público, año de lanzamiento, número de lanzamiento de ese año, año actual, día del año y fracción del día actual. Además de información de los parámetros de fuerza del modelo de cálculo: coeficiente balístico, segunda derivada de la velocidad media, términos de arrastre..., y al final de la línea un dígito de control.
- Tercera línea (línea 2): contiene información del estado puntual del satélite: el mismo número de serie de la línea 1, inclinación en grados, longitud del nodo ascendente (ángulo longitudinal de paso por el plano ecuatorial respecto una dirección de referencia), excentricidad de órbita, ángulo de aumento del perigeo, anomalía media, revoluciones por día y finalmente un dígito de control. [8]

```

NOAA 18
1 28654U 05018A 21234.10509604 .00000100 00000-0 78213-4 0 9992
2 28654 98.9896 299.2162 0015344 97.2513 263.0404 14.12631563837808

```

Fig. 2.4: Ejemplo del contenido de un archivo .TLE del NOAA-18.

Entre los *software* de seguimiento de satélites más utilizados se encuentran:

- **Predict:** es un *software* gratuito de predicción de satélites de código abierto disponible para Linux. Permite interactuar con él mediante la consola de comandos de Linux, por lo que puede resultar útil a la hora de crear *scripts* para obtener las horas de las pasadas y automatizar procesos relacionados con la recepción de señales de satélites.
- **Gpredict:** es un *software* gratuito de predicción de satélites disponible tanto para Windows, Mac o Linux. Ofrece una interfaz gráfica que nos permite ver de forma visual la posición del satélite y su trayectoria futura.

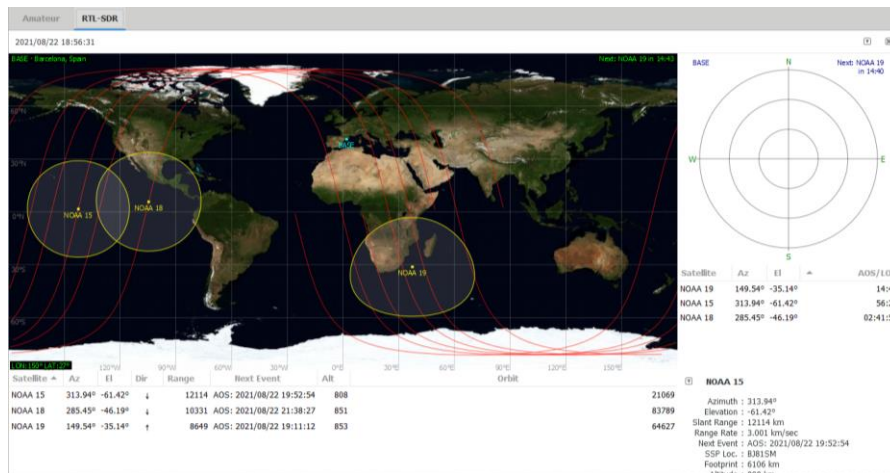


Fig. 2.5: Pantalla principal del *software* Gpredict.

Este tipo de *software* nos permite saber en tiempo real la posición de los satélites además de datos como la elevación y el azimut, entre otros.

2.2.2 Equipamiento receptor necesario

Para poder recibir las señales del satélite será imprescindible un equipo receptor de radio, y una antena adecuada para trabajar a 137MHz, que debe estar colocada en un punto en que no tenga obstrucciones como edificios o montañas que atenúen o bloqueen la señal del satélite.

2.2.2.1 Receptor de radio VHF

Para recibir las señales de los satélites NOAA se pueden utilizar receptores o transceptores de VHF, que sean capaces de recibir a 137 MHz en FM (muchos cubren de 136 a 174MHz) (Fig.2.6).



Fig. 2.6: Transceptores de VHF, fijo y portátil.

La salida de audio del receptor se conectará a la entrada del ordenador o decodificador (normalmente mediante un cable de audio con conectores *jack*), que tendrá el *software* que se encargará de decodificar la señal y obtener las imágenes. También se puede grabar la salida de audio del receptor de una pasada, para posteriormente obtener las imágenes a partir de la grabación.

2.2.2.2 Receptor dongle SDR

Un receptor SDR (*Software Defined Radio*) permite implementar los componentes hardware de un equipo tradicional de radio (mezcladores, moduladores, demoduladores, filtros, etc.) mediante *software* y computación, aplicando procesado de señal. Esto permite tener la capacidad de recibir o transmitir en un rango amplio de frecuencias sin tener que realizar modificaciones hardware al equipamiento dependiendo del tipo de señales que queramos recibir, al ser todas las modificaciones vía *software*. Todo ello permite simplificar y reducir físicamente el tamaño de los equipos de recepción o transmisión, además de reducir su coste.

Últimamente se ha popularizado mucho su uso debido a su gran versatilidad y a su reducido coste, especialmente con los *dongle* USB RTL-SDR (Fig.2.7).

Estos *dongle* USB fueron comercializados para la recepción de la TDT (Televisión Digital Terrestre) o DVB-T (Digital Video Broadcast-Terrestial) con la implantación de la misma hace unos años. Sin embargo, se descubrió que con el *software* adecuado, también podían ser utilizados como receptores SDR multibanda (de 500KHz a 1,75GHz aprox.) de bajo coste, ofreciendo un ancho de banda de hasta 2,4 MHz. El nombre "RTL" se debe al equipar en su placa el chip RTL2832U como controlador. Su precio ronda entre los 10 y 30 €. Es una de las formas más baratas de experimentar con la recepción de señales de radio.



Fig. 2.7: Dongle para DVB-T.

También se ha convertido en una de las formas más utilizadas para recibir señales de satélites como los NOAA, debido su bajo coste y simplicidad. Además no es necesario realizar grabaciones ya que el decodificado de la imagen se puede realizar hacer a medida que va pasando el satélite y envía

líneas de imagen, lo que resulta útil ya que se puede supervisar si la recepción es buena y que el proceso se realiza correctamente.

Existen diversos *softwares* que permiten analizar las diferentes bandas de frecuencia que puede captar el dispositivo SDR, como si de un analizador de espectro se tratase. Puede utilizarse para sintonizar señales de interés y que otro programa las tome como entrada para que las procese. Uno de los más utilizados es *SDR#* (Fig.2.8), que es sencillo de utilizar, gratuito y con muchas funcionalidades.[4][9]

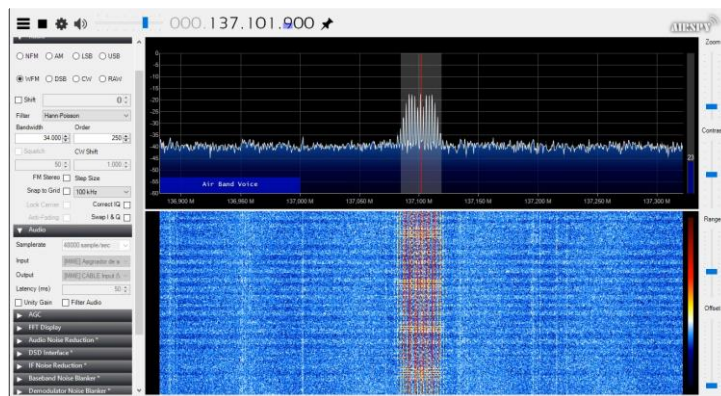


Fig. 2.8 Ventana principal del SDR#, recibiendo la señal del NOAA-19.

2.2.3 Software de procesamiento de la señal

La señal de 137 MHz ha sido recibida y demodulada por el receptor FM para obtener la señal con la subportadora a 2400Hz modulada en amplitud, que contiene la información de las imágenes APT, que tendrá que ser decodificada por un *software*. El más utilizado:

- **WXtoImq**: es un *software* que permite decodificar imágenes APT, disponible para Windows, MAC OS y Linux. Permite grabar el audio de la señal del NOAA, decodificar imágenes, editarlas, añadir filtros, crear imágenes compuestas de varias pasadas, predecir las pasadas de los satélites, comenzar y dejar de grabar automáticamente, visualizar en directo cómo se decodifica la imagen, entre otros.

Como entrada de la señal a decodificar puede tomar la salida de un receptor SDR (señal seleccionada previamente en un *software* como *SDR#*) conectado al USB del ordenador, o la salida de audio de un receptor tradicional conectado con un conector *jack* 3,5mm a la entrada de micrófono del ordenador. También puede tomar como entrada una grabación de audio de una pasada (.mp3, .wav)(Fig.2.9).[9], [10]

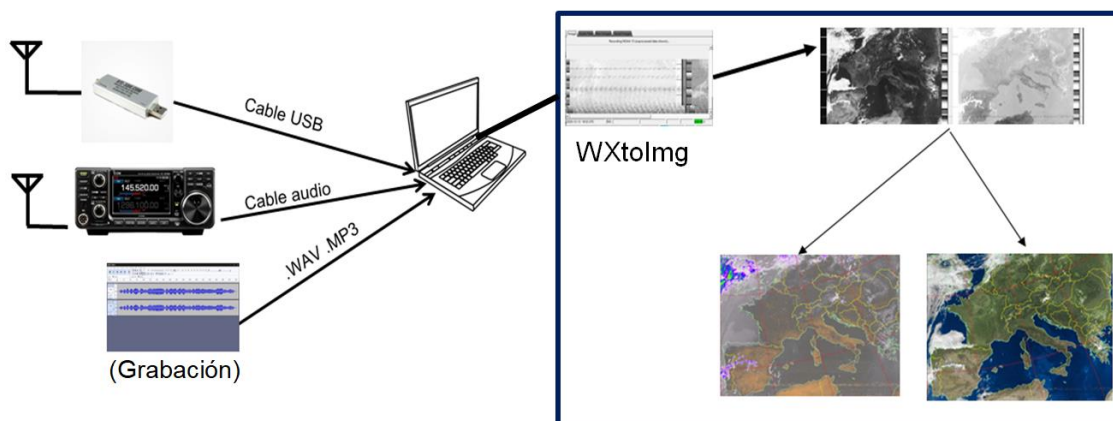


Fig. 2.9: Diferentes maneras de obtener las imágenes de los NOAA.

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA PARA LA RECEPCIÓN DE SEÑALES DE SATÉLITES NOAA

3.1 Tipos de antenas para la recepción de imágenes de satélites NOAA.

Para la recepción de imágenes de satélites NOAA transmitidas por modo APT, es fundamental tener una buena antena para recibir la señal con un buen SNR (Signal to Noise Ratio), para que las imágenes recibidas tengan una buena calidad.

Existen muchos diseños de antena que en principio podrían servir. Se han de tener en cuenta una serie de factores: desempeño, coste económico, tamaño, robustez, transportabilidad, peso y complejidad.

3.1.1 Dipolo en “V”

Se trata de un dipolo tradicional con sus dos elementos de longitud $(1/4) \cdot \lambda$ a 120° . Es una de las antenas más sencillas y baratas que existen. Se puede hacer fácilmente transportable y rápida de desplegar debido a su reducido número de partes, además resulta ligera y puede ser situada fácilmente en un mástil.

Es recomendable situarla con el plano formado por los elementos, paralelo al suelo, con tal de atenuar por polarización cruzada las señales de emisoras de tierra cercanas que normalmente transmiten con polarización vertical (Fig.3.1). El diagrama de radiación es omnidireccional con forma de “donut” como el de un dipolo, pero al tener un ángulo menor de 180° entre sus elementos se incrementa la ganancia aplanando el diagrama de radiación de “donut”.

Para aprovechar este diagrama de la antena a la hora de recibir la señal de los NOAA, se debe apuntar la “V” hacia uno de los polos (es indiferente a cual).

El principal inconveniente de usar esta antena es que introducirá una pérdida de 3 dB en la señal del NOAA, debido a que estaremos recibiendo una señal de polarización circular con una antena de polarización lineal.

Otro inconveniente es que al no tener reflector o plano de tierra puede recibir señales no deseadas de tierra.



Fig. 3.1: Dipolo en V.

3.1.2 Dipolo Cruzado o *Turnstile*

Esta antena de polarización circular se basa en tener dos dipolos de $\lambda/2$ en cuadratura. Es decir, los dipolos están físicamente situados ortogonalmente uno respecto del otro y además desfasados eléctricamente 90° en la línea de transmisión lo que resulta en una antena de polarización circular o CP (Circular Polarized). Cuando una señal de CP incida sobre nuestra antena, en un instante dado, uno de los dipolos no recibirá señal, pero el otro sí (y viceversa) (Fig.3.2).

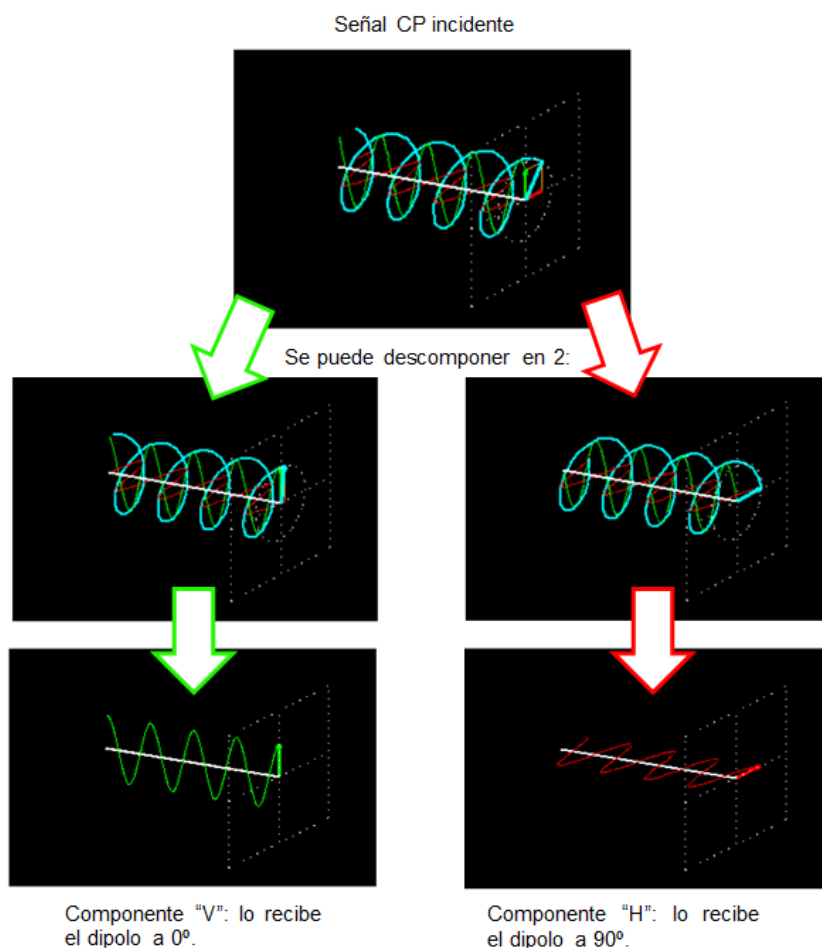


Fig. 3.2: Componentes de una señal de CP.

Los elementos están situados paralelos al suelo por lo que ayudará a atenuar señales de tierra que podrían interferir.

Dependiendo de la configuración de conexión de los dipolos, la antena será de polarización circular derecha o RHCP (Right Hand Circular Polarized), o polarización circular izquierda o LHCP (Left Hand Circular Polarized).

A las antenas *Turnstile* se les puede añadir un reflector a una longitud múltiples de $\lambda/4$ para modificar la ganancia de la antena y también atenuar posibles señales provenientes de debajo (Fig.3.3). Es una antena relativamente sencilla de construir y de adaptar.



Fig. 3.3: Antena Turnstile con un reflector.

Una antena tipo *Turnstile* fue equipada en el satélite meteorológico TIROS-1 y en otros de la serie TIROS, para la transmisión de imágenes hacia la tierra. [11],[4]

3.1.3 Antena de hélice cuadrifilar o QFH (Quadrifilar Helix)

La antena QFH es una de las antenas de polarización circular más conocidas para la recepción de imágenes del protocolo APT (Fig.3.4). Es la teóricamente la antena que debería ser capaz de captar la señal enviada por los NOAA con la mejor eficiencia, ya que al ser una antena de forma helicoidal no importa el ángulo con que incida la señal en la antena. El principal inconveniente de esta antena es la elevada complejidad de diseño, construcción y más aún de su correcta adaptación para que la antena resuene a la frecuencia objetivo.[12][13]



Fig. 3.4: Antena QFH.

3.2 Diseño, construcción y de una antena tipo *Turnstile* para 137,5 MHz

Debido las ventajas que ofrece la antena de dipolo cruzado o *Turnstile*, se ha elegido a este modelo como antena de la estación de tierra para este proyecto. Por ello se diseñará y se construirá un modelo de esta antena, adaptada para trabajar a la frecuencia de 137,5MHz. Basada principalmente en los diseños de Cebik (ver [11])y de Brugnera (ver [14], [15]).

3.2.1 Diseño preliminar

La antena *Turnstile* tendrá como estructura principal un tubo de PVC de 40 mm de diámetro y 2.5 m de largo, que hará de mástil.

En el extremo superior de este tubo se encontrará una caja estanca plástica de donde saldrán los cuatro elementos metálicos de los dos dipolos cruzados (que serán los elementos activos de la antena). Saldrá cada uno por un orificio en cada esquina de la caja (aprovechando que la longitud diagonal es mayor) y estarán fijados a la base de la misma, que tendrá que resistir el peso de estos. Dentro de la caja también se realizarán las conexiones eléctricas del cableado con estos elementos, por lo que debe haber espacio suficiente.

La caja estará fijada al mástil mediante una pieza que encaje tanto en el tubo como en la caja, además tendrá que ser hueca para dejar pasar el cableado.

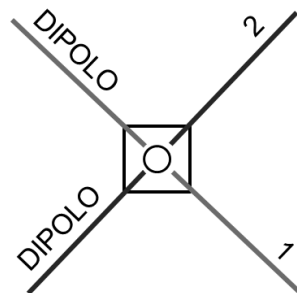


Fig. 3.5: Boceto en planta de la *Turnstile* visto desde arriba

A una distancia de los dipolos en el mástil se colocará un reflector formado por dos elementos metálicos, paralelos a los elementos del dipolo.

De la parte inferior del mástil saldrá un cable coaxial de varios metros con un conector en el extremo para poder conectar la antena al receptor.

3.2.2 Construcción de los dipolos

Los elementos de los dipolos serán tubos de aluminio hueco de 8mm de diámetro. Se ha elegido aluminio debido a que es un material ligero (lo que reducirá el peso de la antena, especialmente de la parte superior), buen conductor, resistente a la corrosión, fácil de trabajar y relativamente barato. Se han elegido huecos para aumentar su ligereza y resistencia a doblarse (ya que estarán en voladizo y han de resistir su propio peso). Debido a que el aluminio es muy difícil de soldar con estaño, las conexiones serán por unión mecánica, mediante terminales atornillados.

Primeramente se cortan 4 tubos de aluminio (elementos de los dipolos) a longitud $\lambda/4$. [11], [14] Se obtiene “ λ ” (longitud de onda) a partir de la ecuación (3.1) que la relaciona con la “ c ” (velocidad de la luz en el vacío) entre la “ f ” (frecuencia).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{f} \cdot \frac{1}{4} \quad (3.2)$$

$$l = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{137,5 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}} \cdot \frac{1}{4} = \frac{2,189\text{m}}{4} = 0,547\text{m} \quad (3.3)$$

Se cortarán 4 tubos de 0,547m cada uno, mediante con un cortatubos (más preciso, limpio y sencillo que con una sierra) (Fig.3.6).

Seguidamente se marcarán puntos a 4mm del extremo de los tubos, donde se realizarán taladros de $\varnothing 4\text{mm}$. Estos orificios servirán tanto para pasar el tornillo que fijará los tubos a la base de la caja, como para realizar las conexiones de los tubos con el coaxial mediante terminales redondos. Para que haya una buena conexión eléctrica del tubo de aluminio con el terminal se deberá limar el acabado anodizado del tubo.

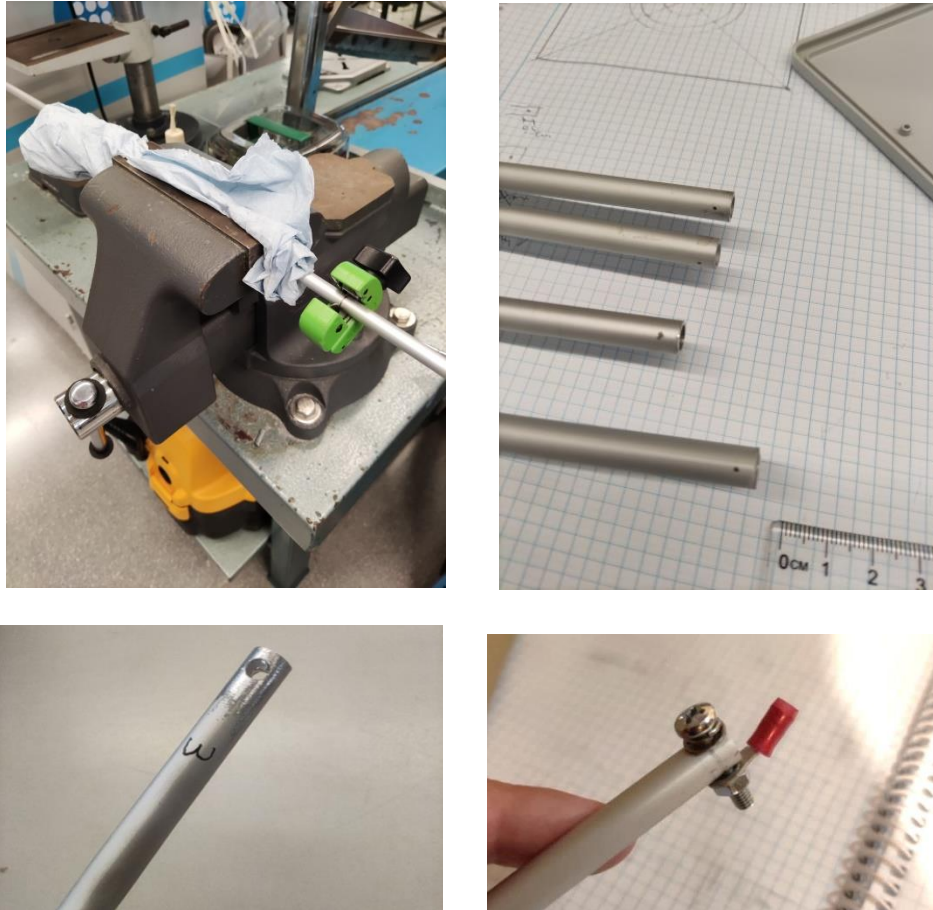


Fig. 3.6: Mecanizado de los tubos de aluminio que harán de elementos del cuadripolo de la antena.

La caja que se decide utilizar tiene unas dimensiones de 10x10x4,5 cm. Su diseño es completamente liso, tanto exterior como interior, y sin agujeros previos, lo que mejora su rigidez (Fig.3.7).



Fig. 3.7: Caja donde irá el conexionado de la antena y se fijarán los tubos de aluminio.

Para mejorar aún más la resistencia de la caja, se decide colocar en la base interior de la misma una placa rígida de fibra de vidrio de 1,6mm de grosor que cubra toda la superficie (Fig.3.8).

Seguidamente, se hacen orificios de $\varnothing 8\text{mm}$ en cada esquina lateral de la caja para dar salida a los tubos de aluminio (teniendo en cuenta el extra de altura de la placa de fibra de vidrio añadida para que los tubos apoyen sobre esta).

Para el anclaje de la caja al mástil de PVC se utiliza un manguito de unión de tuberías de PVC de 40mm. Este es de plástico grueso y resistente, además es hueco, lo que permite pasar por dentro el cableado hasta la caja. Al manguito se le realizan varios fresados de forma rectangular en la mitad superior de la pieza, quedando la pieza con una forma de “tuerca almenada” que encajará con unos fresados realizado en la base de la caja y placa de fibra. Se realizan cuatro taladros de $\text{Ø}4\text{mm}$ a una distancia de 18 mm del centro de la caja, por donde pasarán los tornillos de métrica M4x20mm que fijarán los tubos a la base de la caja. Además de un agujero central de $\text{Ø}14\text{mm}$ que servirá para pasar el cableado. Se comprueba el encaje de todas las piezas y se realizan los ajustes necesarios.

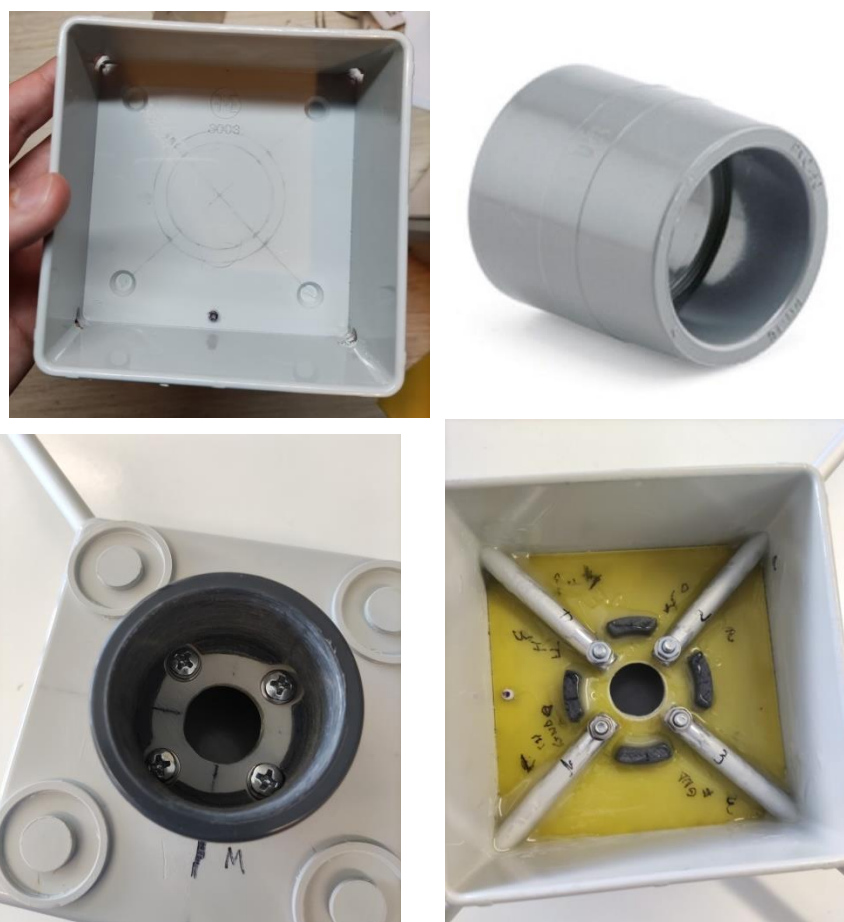


Fig. 3.8: Mecanizado de la caja, del manguito y de la placa de fibra de vidrio, encaje entre las diferentes piezas

3.2.3 Ajuste a la frecuencia de resonancia

El siguiente paso será el ajustar la longitud de los elementos de los dipolos para que resuenen a 137,5MHz[11], ya que aunque se hayan cortado a la medida teórica de $\lambda/4$, factores como el metal utilizado o tramo de desde el coaxial al descubierto hasta la conexión atornillada; pueden tener afectación en la frecuencia de resonancia y desplazarla. Esto se comprobará mediante un Analizador de Redes.

Para ello se toma un cable coaxial de impedancia característica 50Ω , en este caso RG-223, (ver características técnicas en Anexo A.1) con un SMA en un extremo, y en el otro dos terminales redondos crimpados (uno al conductor

central y otro a la malla) que se atornillarán respectivamente a los dos elementos del dipolo que están fijados a la caja (Fig.3.9).



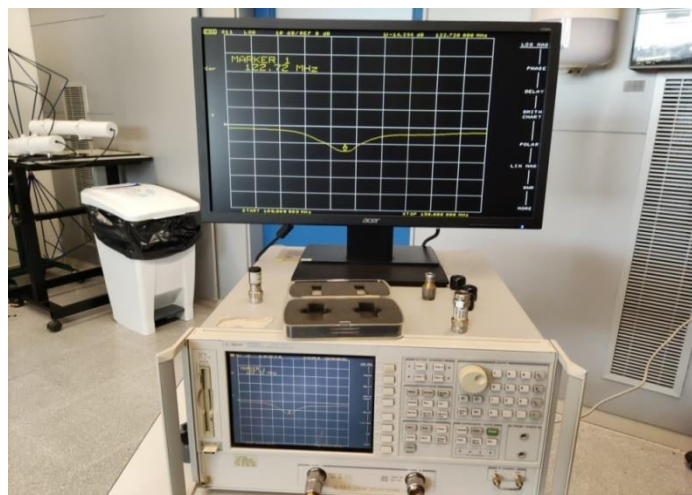
Fig. 3.9: Dipolo y su conexionado

Antes de empezar a realizar medidas con el Analizador de Redes, es necesaria su calibración utilizando un kit de calibración de 50Ω , para que las medidas tomadas tengan sentido. En el Anexo A.2 se detalla este procedimiento.

Para realizar medidas del dipolo, el conjunto caja-dipolo es elevado del suelo (Fig.3.9) y se conecta el SMA al Puerto 1 (ya calibrado) del Analizador de Redes. Es importante mantener cierta distancia con el dipolo ya que la proximidad con el cuerpo humano afecta a las características de la antena.

En el analizador se selecciona el rango de frecuencias a visualizar alrededor de los 137,5 MHz (de 100 a 150MHz o de 100 a 200MHz). A continuación, se selecciona el modo de visualización del parámetro S11 en escala logarítmica y se moverá el cursor hasta la frecuencia donde haya una mayor atenuación (Fig.3.10). Esta será la frecuencia de resonancia actual de la antena, pues será cuando la antena absorba una mayor cantidad de energía para radiarla.

En este caso la frecuencia de resonancia se encuentra a 122,72MHz por lo que habrá que realizar ajustes en la longitud de los elementos del dipolo para llevarla a 137,5MHz.



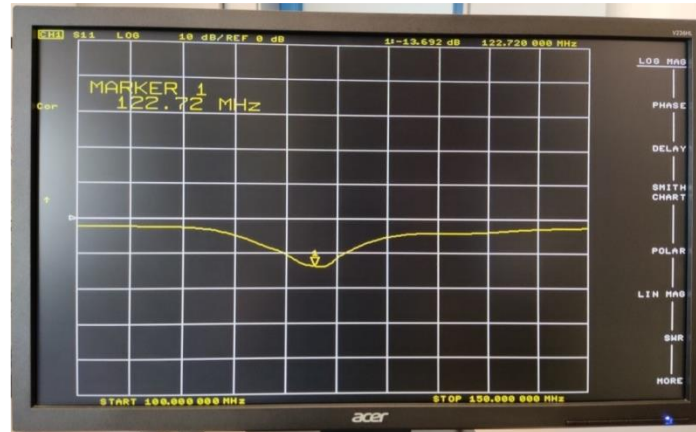


Fig. 3.10: Frecuencia de resonancia original del dipolo

Al encontrarse en una frecuencia más baja que la objetivo, la longitud de los elementos del dipolo debe ser acortada para que la frecuencia de resonancia aumente. Se puede realizar el cálculo para estimar qué longitud será necesario recortar, obteniendo la diferencia de $\lambda/4$ entre las dos frecuencias:

$$l_{122,7} = \frac{\lambda_{122,7}}{4} = \frac{c}{f_{122,7}} \cdot \frac{1}{4} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{122,7 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}} \cdot \frac{1}{4} = 0,611 \text{ m} \tag{3.4}$$

$$l_{137,5} = \frac{\lambda_{137,5}}{4} = \frac{c}{f_{137,5}} \cdot \frac{1}{4} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{137,5 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}} \cdot \frac{1}{4} = 0,547 \text{ m} \tag{3.5}$$

Obtenemos la diferencia (ecuación 3.7) (distancia a recortar):

$$\Delta l = l_{actual} - l_{objetivo} = l_{122,7} - l_{137,5} \tag{3.6}$$

$$\Delta l = l_{122,7} - l_{137,5} = 0,611 - 0,547 = 0,064 \text{ m} = 6,4 \text{ cm} \tag{3.7}$$

El tramo teórico a recortar en cada elemento del dipolo, para llegar a la frecuencia de resonancia de 137,5MHz será de 6,4cm.

Para evaluar de forma progresiva como se desplaza la frecuencia de resonancia, se harán cortes en pequeños tramos de 1 o 2 cm:

- Primer corte (2cm): Tras eliminar 2cm de cada uno de los dos elementos, la nueva frecuencia de resonancia pasa a ser 128MHz (Fig.3.11).

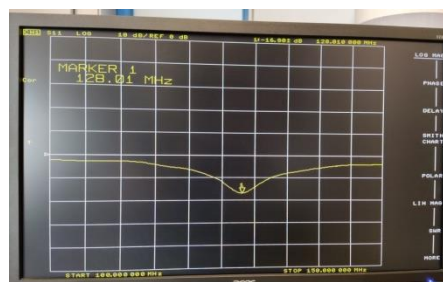


Fig. 3.11: Frecuencia de resonancia tras el primer corte.

- Segundo corte (2cm): Con este segundo corte se eliminan otros 2cm llevando la frecuencia de resonancia a 132,6MHz (Fig.3.12). Se decide cambiar el ancho de banda visible de 100MHz a 200MHz para tener una visión más global.

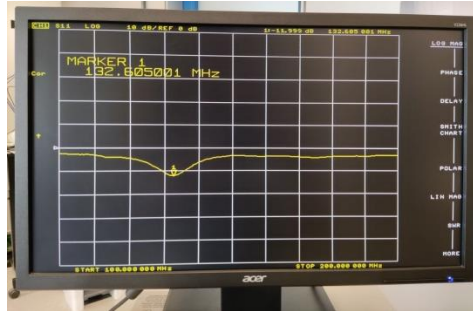


Fig. 3.12: Frecuencia de resonancia tras el segundo corte.

- Tercer corte (1cm): Al estar más cerca de la frecuencia de resonancia se decide ir más despacio evitar pasarse, por lo que se elimina 1 cm. La frecuencia de resonancia pasa a 135,11MHz (Fig.3.13).

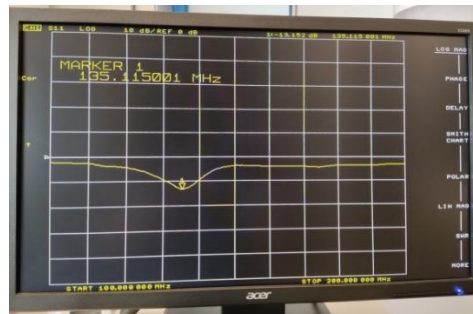


Fig. 3.13: Frecuencia de resonancia tras el tercer corte.

- Cuarto corte (1cm): Con este cuarto corte la frecuencia de resonancia llega a los 137,5MHz objetivo (Fig.3.14).

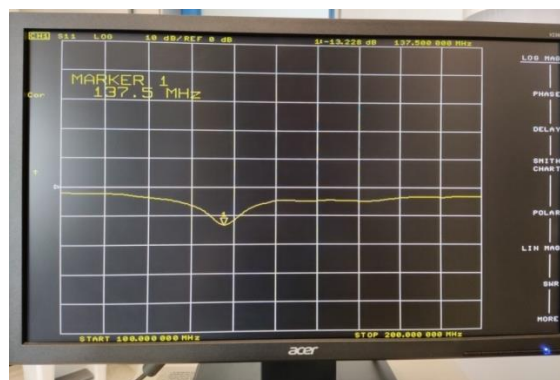


Fig. 3.14: Frecuencia de resonancia objetivo alcanzada tras el cuarto corte.

En total se han retirado 6cm de cada elemento del dipolo (una diferencia de 0,4cm con los 6,4cm teóricos) (Fig.3.15). La medida de final de los elementos será de 48,47cm, frente a la inicial de 54,47cm.



Fig. 3.15: Elementos de los dipolos acortados y elementos sin acortar.

Los elementos del segundo dipolo se cortan a esta misma medida y se comprueba su frecuencia de resonancia con el Analizador de Redes (Fig.3.16).

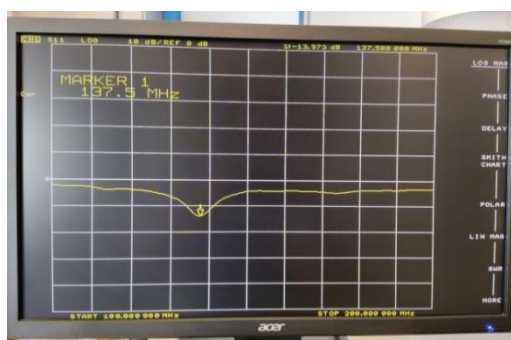


Fig. 3.16: Frecuencia de resonancia del segundo dipolo tras aplicar el recorte.

Una vez llevados ambos dipolos a la frecuencia de resonancia, se puede pasar a elaborar el cableado de la antena *Turnstile*. [11]

3.2.4 Cableado de la antena

- Cables de fasado:

Para que ambos dipolos estén eléctricamente desfasados 90° uno del otro se utilizarán cables fasados. Esto consiste en que el cable que va al dipolo que está desfasado 90° y será entorno a $\lambda/4$ más largo que el que va al dipolo a 0°.

Al estar en un medio físico como es el cable, se tendrá que tener en cuenta la velocidad de propagación en el mismo. Para RG-223 es 0,66 (A.1).

Por lo tanto del dipolo a 0° (directo), saldrá un coaxial de 50Ω RG-223 una medida de $\lambda/4$ multiplicado por la “Vp” (velocidad de propagación) (ecuación 3.8)[11], [15]:

$$l_d = \frac{1}{4} \cdot \lambda \cdot Vp \tag{3.8}$$

$$l_d = \frac{1}{4} \cdot 2,189m \cdot 0,66 = 0,361 m \tag{3.9}$$

Y del dipolo a 90° (desfasado), saldrá un coaxial de 50Ω RG-223 con la una medida de $\lambda/2$ multiplicado por la “Vp” (ecuación 3.10)[11], [14]:

$$l_f = \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot Vp \tag{3.10}$$

$$l_f = \frac{1}{2} \cdot 2,189m \cdot 0,66 = 0,722 m \tag{3.11}$$

El cable directo tendrá una longitud de 0,361m y el desfasado 90° una longitud de 0,722m. Ambos cables se unirán en sus extremos y en los contrarios tendrán terminales redondos en el conductor central y en la malla (Fig.3.17).



Fig. 3.17: Cableado fasado y terminales.

- Transformador de impedancias:**
 El transformador de impedancias permitirá que la impedancia característica de la antena se encuentre próxima a los 50Ω . Este se conectará al extremo donde los cables fasados se unen. Estará formado por dos coaxiales en paralelo de 75Ω modelo RG-59 con una longitud de $(\lambda/4)$ (Fig.3.18) [11], [14]. En un extremo se unirá a la terminación de los cables de fasado de la forma que se ve en la (Fig.3.18)[15], y en el contrario se unirán entre sí. Como antes, para obtener su longitud se tendrá que tener en cuenta la velocidad de propagación en el mismo, que para el cable RG-59 es de 0,66.
 Se calcula la longitud de cada uno de los cables del transformador de impedancias con la siguiente expresión (3.12) (misma ecuación que la 3.8):

$$l_t = \frac{1}{4} \cdot \lambda \cdot Vp \quad (3.12)$$

$$l_t = \frac{1}{4} \cdot 2,189m \cdot 0,66 = 0,361 m \quad (3.13)$$

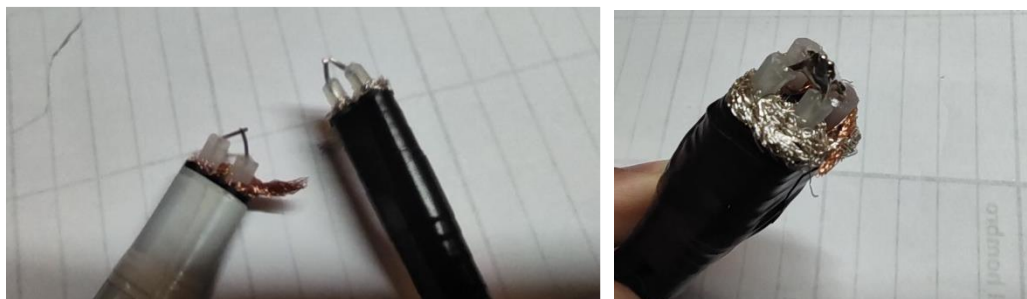


Fig. 3.18: Transformador de impedancias.

- Cable conexión antena-receptor:
Después del transformador de impedancias habrá una línea de coaxial de 50Ω RG-223 con un conector SMA en su extremo, que permitirá conectar la antena a un receptor. El otro extremo irá unido a la terminación del transformador de impedancias (Fig.3.19). La longitud de este último tramo es indiferente. Para este proyecto se eligió una longitud de 4m, pues el cable debe bajar por el mástil de 2,5m y luego tener longitud suficiente para poder realizar conexiones con un receptor o con otro cable.

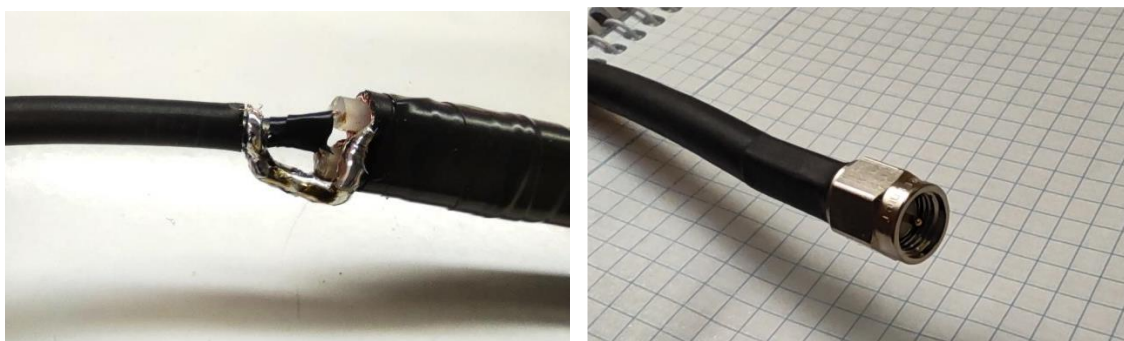


Fig. 3.19: Tramo final del cableado con conector SMA.

Esquema del cableado de la antena *Turnstile* (Fig.3.20).

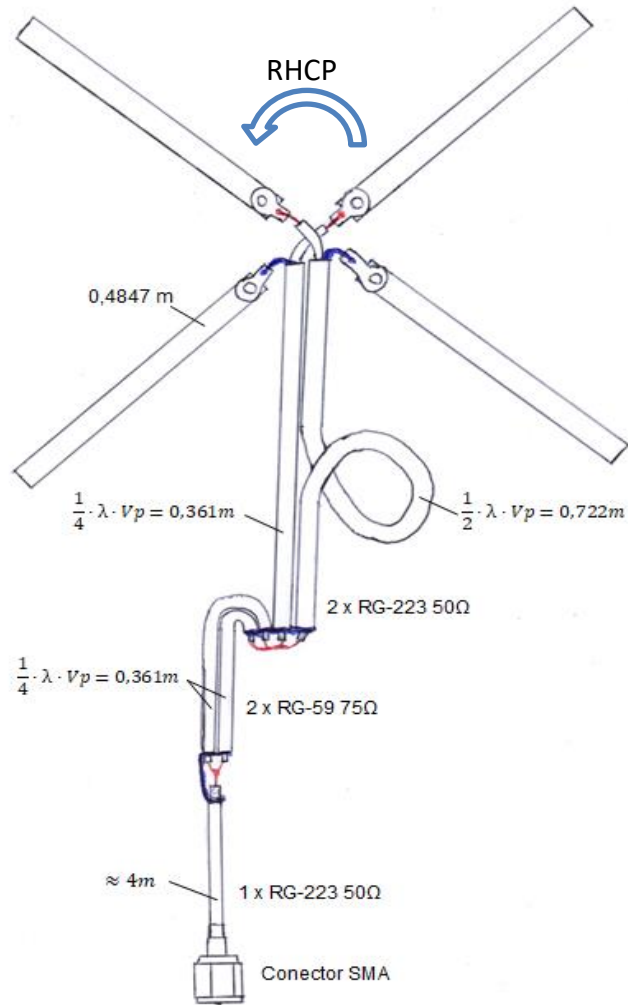


Fig. 3.20: Esquema del cableado de la antena Turnstile.

Una vez realizado el cableado, este se conectará a los dipolos de la antena en orden para que la antena sea RHCP (Fig.3.20)[11], [14] mediante los conectores atornillados (Fig.3.21) y se procede al análisis del parámetro S11 de la misma mediante el Analizador de Redes.



Fig. 3.21: Dipolo cruzado o Turnstile en pruebas.

Se sitúa la antena a cierta altura del suelo y se conecta el SMA al puerto 1 del analizador. Se accederá la pantalla de visualización del parámetro S11 en

escala logarítmica. Se puede observar que la frecuencia de resonancia se encuentra prácticamente en 137,5 MHz (Fig.3.22).

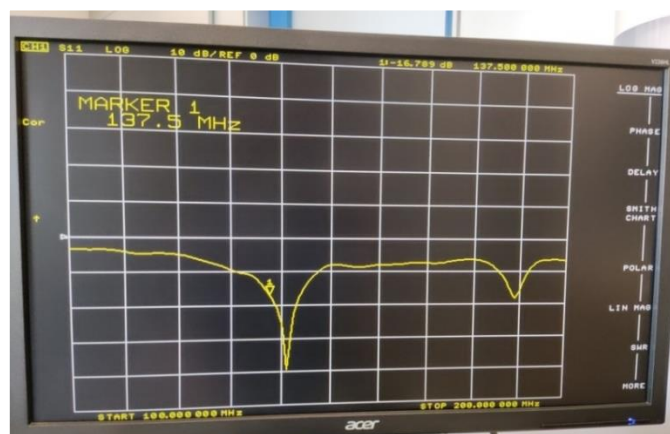


Fig. 3.22: Atenuación del dipolo cruzado en escala logarítmica.

Al cambiar a la visualización de la carta de Smith se podrán visualizar valores como la impedancia característica de la antena para cada frecuencia. Cuanto más cerca del centro de la carta de Smith se encuentre para la frecuencia de interés, mejor adaptada estará la antena (ya que el centro representa la carga de 50Ω perfecta).

Para esta antena se puede ver que la impedancia característica es de 38Ω (Fig.3.23) (durante las mediciones varía alrededor de los 40Ω). Se encuentra cerca del valor buscado de 50Ω , por lo que es un valor aceptable.

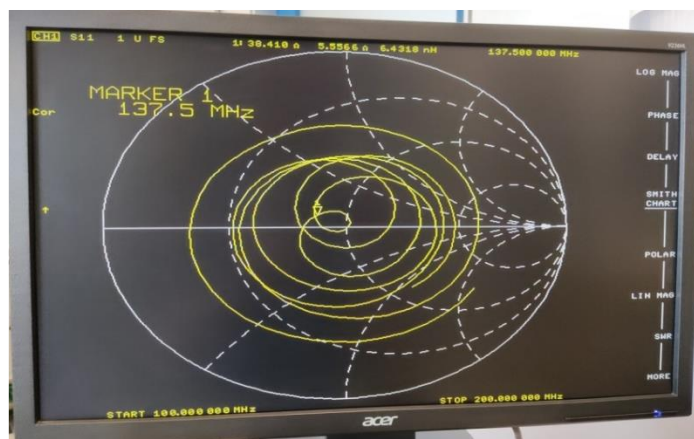


Fig. 3.23: Carta de Smith del dipolo cruzado

El modo de visualización de la ROE (Relación Onda Estacionaria) o SWR (Standing Wave Ratio), es otra forma de cuantificar la buena adaptación de la antena. Cuanto más próximo a 1 sea el valor de la ROE, mejor adaptada estará la antena y más eficiente será, pues menores pérdidas se producirán, tanto en recepción como en transmisión.

Para este dipolo cruzado se obtiene que el valor de la ROE es 1,34 (Fig.3.24).



Fig. 3.24: ROE del dipolo cruzado

3.2.5 Construcción del reflector y ajuste

Una vez finalizado el dipolo cruzado, se procede a construir e instalar los elementos del reflector.

El reflector estará formado por dos tubos de aluminio del mismo tipo que los usados hasta ahora. Los elementos reflectores se colocarán paralelos a cada dipolo. El reflector es un elemento pasivo, por lo que no tendrá que ser cableado.

La longitud de los reflectores no resulta tan crítica como la de los elementos del dipolo cruzado, se recomiendan longitudes del mismo tamaño que estos o ligeramente superior.

Para esta antena la longitud de los elementos reflectores será la longitud entre las puntas del dipolo más un 5% extra [14]. Esta distancia es igual a dos veces a la longitud del elemento ya acortado, más la distancia entre las conexiones del mismo dipolo (en el centro de la caja), más un incremento del 5% (ecuación 3.14).

$$l_{ref} = \left(\left(\frac{\lambda}{4} - l_{adj} \right) \cdot 2 + d_{elem} \right) \cdot 1,05 \quad (3.14)$$

$$l_{ref} = ((0,547m - 0,6m) \cdot 2 + 0,025) \cdot 1,05 = 1,05m \quad (3.15)$$

Se obtiene que el reflector deberá tener una longitud de 1,05m.

La distancia entre el cuadripolo y el reflector debe ser múltiple de $\lambda/4$, esta distancia modificará el patrón de radiación de la antena, cuanto más cercano a los dipolos más direccional resultará la antena.

Según la simulación de J. Carter (ver [16]) (Fig.3.26 para una distancia de $\lambda/2$ se obtiene un patrón de radiación más adecuado que para $\lambda/4$, ya que con $\lambda/2$ cubrimos más las zonas de baja elevación del satélite (cuando está cerca del horizonte)

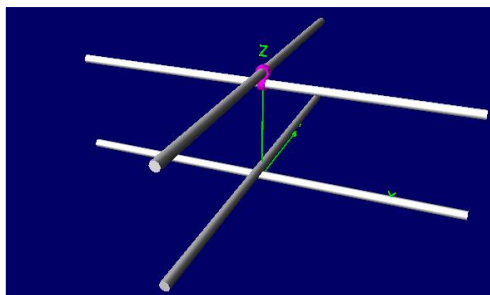


Fig. 3.25: Dipolo cruzado y reflector.

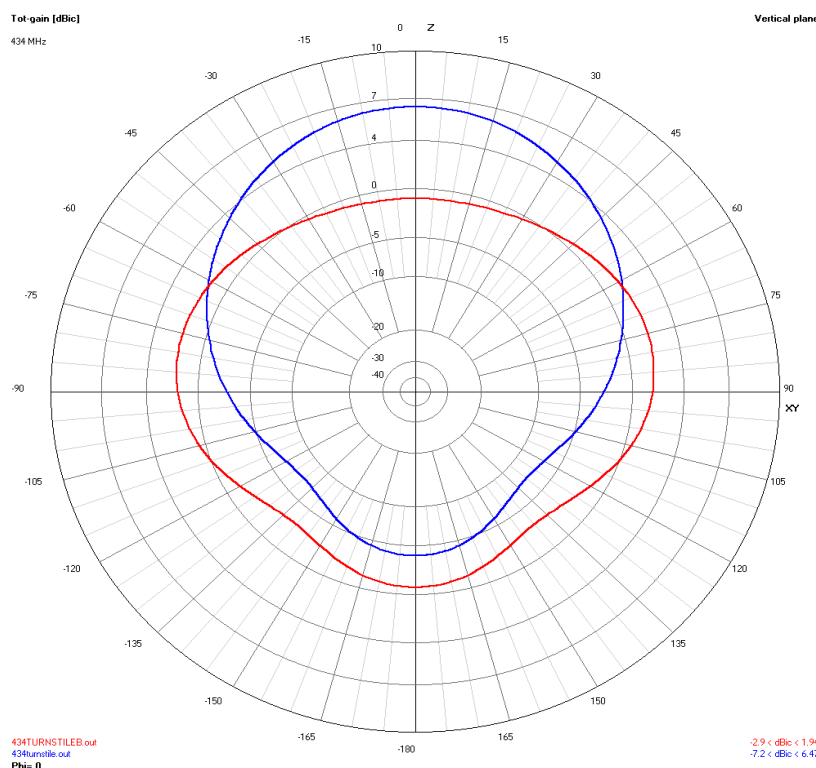


Fig. 3.26: Diagrama de radiación de una antena Turnstile con una distancia entre reflector y dipolos de $\lambda/4$ (azul) y con una distancia de $\lambda/2$ (rojo)[16]

Se realizarán medidas mediante el Analizador de Redes situando el reflector a $\lambda/2$ y a $(3/8) \cdot \lambda$ (ya que también es otra distancia recomendada y es próxima a $\lambda/2$), para ver cuál de las dos supone una mejor adaptación de la antena, ya que el reflector afectará a las características de la antena.

Cálculo de las distancias equivalentes a $\lambda/2$ y $(3/8) \cdot \lambda$:

$$d_{(1/2) \cdot \lambda} = \frac{\lambda}{2} = \frac{2,189m}{2} = 1,095 m \tag{3.16}$$

$$d_{(3/8) \cdot \lambda} = \frac{3 \cdot \lambda}{8} = \frac{3 \cdot 2,189m}{8} = 0,821 m \tag{3.17}$$

A estas dos distancias del cuadripolo, se realizarán en el mástil dos taladros de $\varnothing 8mm$ perpendiculares entre sí, atravesando la totalidad de este para introducir los elementos del reflector (un taladro deberá estar ligeramente más alto que el otro para que se puedan introducir ambos tubos) (Fig.3.27).

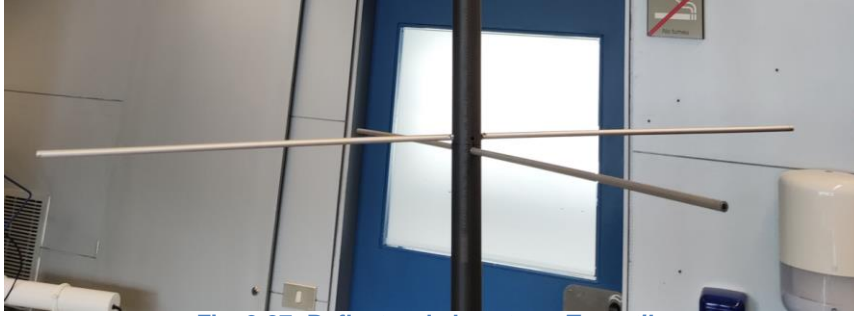


Fig. 3.27: Reflector de la antena *Turnstile*.

Seguidamente mediante el Analizador de Redes se tomarán medidas de la antena para cada caso.

- Reflector a $(1/2) \cdot \lambda$: Situando el reflector a esta distancia (Fig.3.28) se consiguen muy buenos resultados como se puede ver en las gráficas de parámetro S11 en logarítmico con una atenuación alta de -29,7dB (Fig.3.29), en la Carta de Smith con una impedancia de $52,3\Omega$ (muy cerca del centro) (Fig.3.30) y una ROE de 1,06 (prácticamente 1) (Fig.3.31).

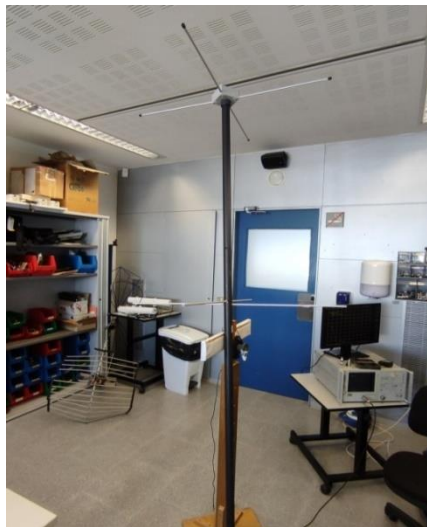


Fig. 3.28: Antena *Turnstile* con el reflector a $(1/2) \cdot \lambda$



Fig. 3.29: Atenuación de la Antena *Turnstile* con el reflector a $(1/2) \cdot \lambda$

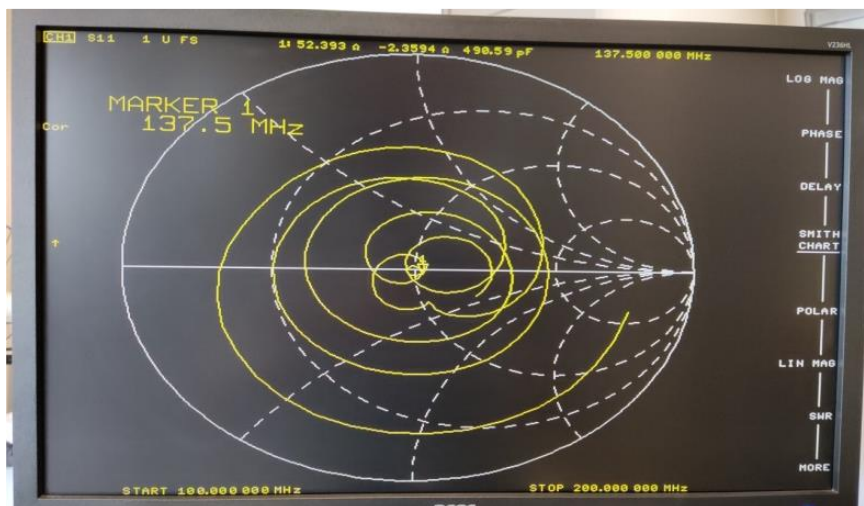


Fig. 3.30: Diagrama de Smith de la Antena *Turnstile* con el reflector a $(1/2) \cdot \lambda$

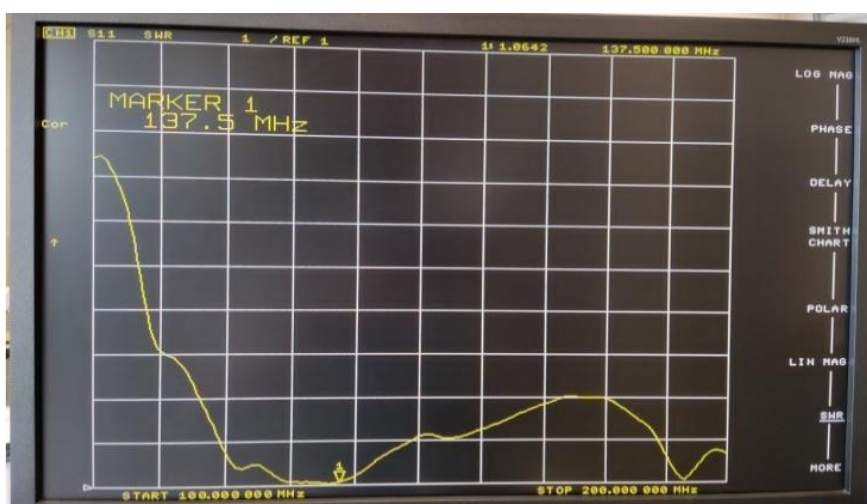


Fig. 3.31: ROE de la Antena *Turnstile* con el reflector a $(1/2) \cdot \lambda$

- Reflector a $(3/8) \cdot \lambda$: Situando el reflector a esta distancia (Fig.3.32) se consiguen unos resultado algo peores, como se puede ver en las gráficas de parámetro S11 en logarítmico con una atenuación de -14,3dB(Fig.3.33), en la Carta de Smith con una impedancia de 35Ω (muy cerca del centro) y una ROE de 1,47(Fig.3.34).



Fig. 3.32: Antena *Turnstile* con el reflector a $(3/8) \cdot \lambda$

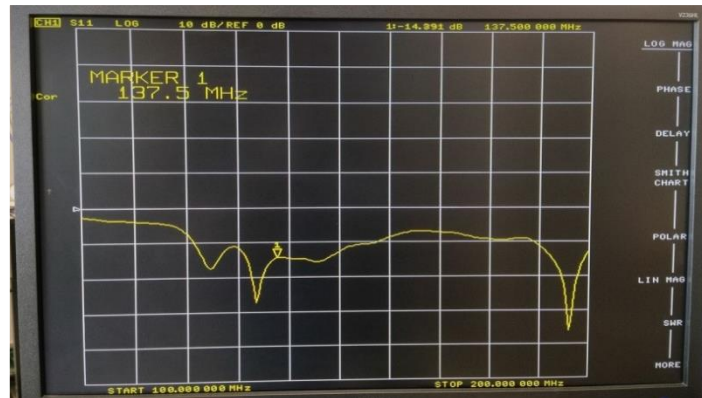


Fig. 3.33: Atenuación de la Antena *Turnstile* con el reflector a $(3/8)\cdot\lambda$

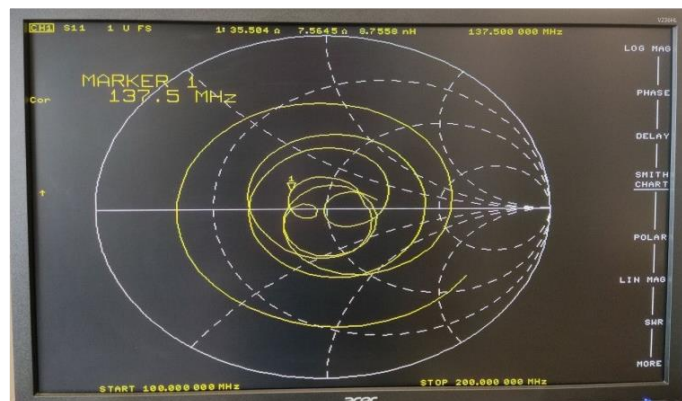


Fig. 3.34: Diagrama de Smith de la Antena *Turnstile* con el reflector a $(3/8)\cdot\lambda$

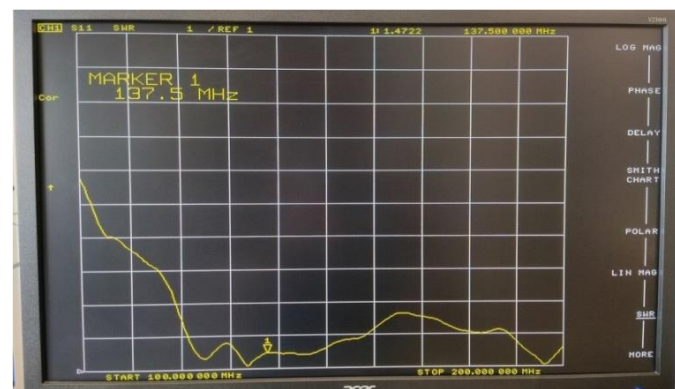


Fig. 3.35: ROE de la Antena *Turnstile* con el reflector a $(3/8)\cdot\lambda$

Tras ver los que los resultados obtenidos son mejores cuando el reflector se encuentra a $(1/2)\cdot\lambda$, se instalará definitivamente a esta distancia.

3.2.6 Ensamblado final

Hasta ahora la mayoría de las partes se encontraban encajadas entre sí sin ningún tipo de adhesivo, con el fin de poder montar y desmontar, para poder realizar todas las pruebas necesarias. Una vez las pruebas han terminado con resultado satisfactorio se procede al ensamblado definitivo de las diferentes partes con adhesivos, (previo lijado de las mismas para la buena adherencia del adhesivo).

Primeramente se unirán, mediante adhesivo epoxy de 2 componentes, la caja y elementos del cuadripolo entre sí, seguidamente el manguito con forma almenada a la caja. A continuación, se asegurarán los terminales del cableado a los elementos del cuadripolo atornillándolos con fuerza y aplicando fijatornillos para evitar que puedan aflojar. Seguidamente se pasará el cableado por el interior del mástil y se aplicará adhesivo para PVC en el exterior del extremo del mástil y en el interior del manguito almenado, para unirlos (teniendo en cuenta la posición para que los elementos del cuadripolo coincidan con los del reflector) (Fig.3.36).

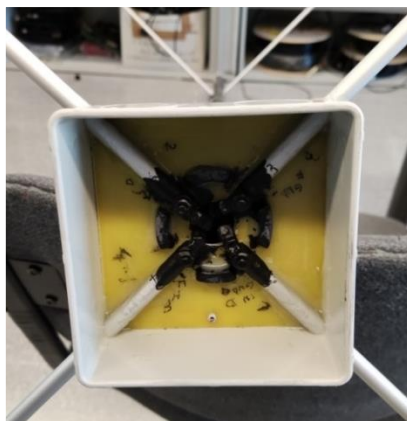


Fig. 3.36: Conexión de los elementos de los dipolos cubiertos con aislante vinílico.

Seguidamente se embridará el cableado de dentro del mástil al mismo, para evitar que el cableado cuelgue de los terminales y pueda romperse. Posteriormente se introducirán los elementos del reflector por los agujeros del mástil, los cuales se bloquearán con tuercas y tornillos a cada lado del mástil a modo de pasadores para evitar que se salgan, y se pegarán al mástil con epoxy para evitar la entrada de agua (Fig.3.37).



Fig. 3.37: Embridado del cableado al mástil y elemento del reflector con tornillo pasador con fijatornillos aplicado.

Por último se volverá a comprobar la antena mediante el Analizador de Redes para verificar que todas las conexiones estén bien. Una vez comprobado se pasará al aislado de las conexiones dentro de la caja con aislante vinílico negro

y se sellará la caja aplicando un sustituto universal de juntas de color naranja (silicona) para impermeabilizarla (Fig.3.38).

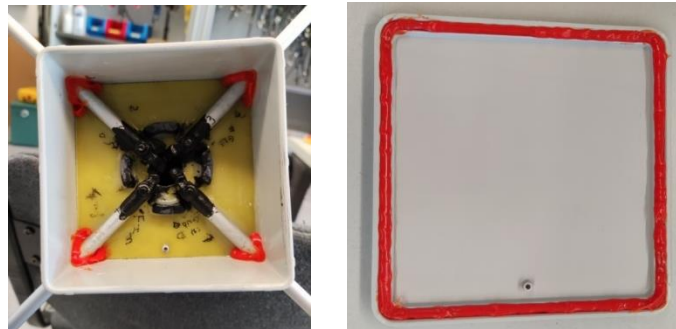


Fig. 3.38: Aplicado del aislante negro y de la silicona para juntas.

Con esto, la antena está completamente terminada y lista para ser instalada.

Tras realizar todo este proceso con éxito, lo único restante por probar es el desempeño de la antena en campo, en la situación real de recepción de la señal de una pasada de un NOAA.

3.3 Prueba de la antena implementada

3.3.1 Prueba de recepción de señales de satélites NOAA.

Se probará la antena con la pasada del NOAA-15 con una elevación máxima de 80°, el 23/8/2021 a las 09:46 hora local. Esta prueba se realizará en el parking del Campus del Baix Llobregat, al ser un lugar con bastante cielo abierto.

Para la prueba se utilizará un dongle RTL-SDR v3 como receptor y un ordenador portátil con el *software*:

- SDR#: para seleccionar y visualizar la señal recibida.
- WXtoImg: para decodificar la imagen.
- Gpredict: para el seguimiento del satélite.

La antena se sujetó mediante un trípode y se conectó el cable de la misma al *dongle* RTL-SDR v3 conectado al PC (Fig.3.39).



Fig. 3.39: Prueba de la antena Turnstile

Antes de la hora de inicio de la pasada se tienen preparados los 3 software y a los pocos segundos se empieza a distinguir la señal del NOAA en SDR#. Cuando el satélite se encuentra a solo 7,58° de elevación la señal llega a un nivel suficiente como para poder decodificar las imágenes, lo cual es muy bueno (Fig.3.40). Cuando llega a los 9°, WXtolmg comenzará a grabar.

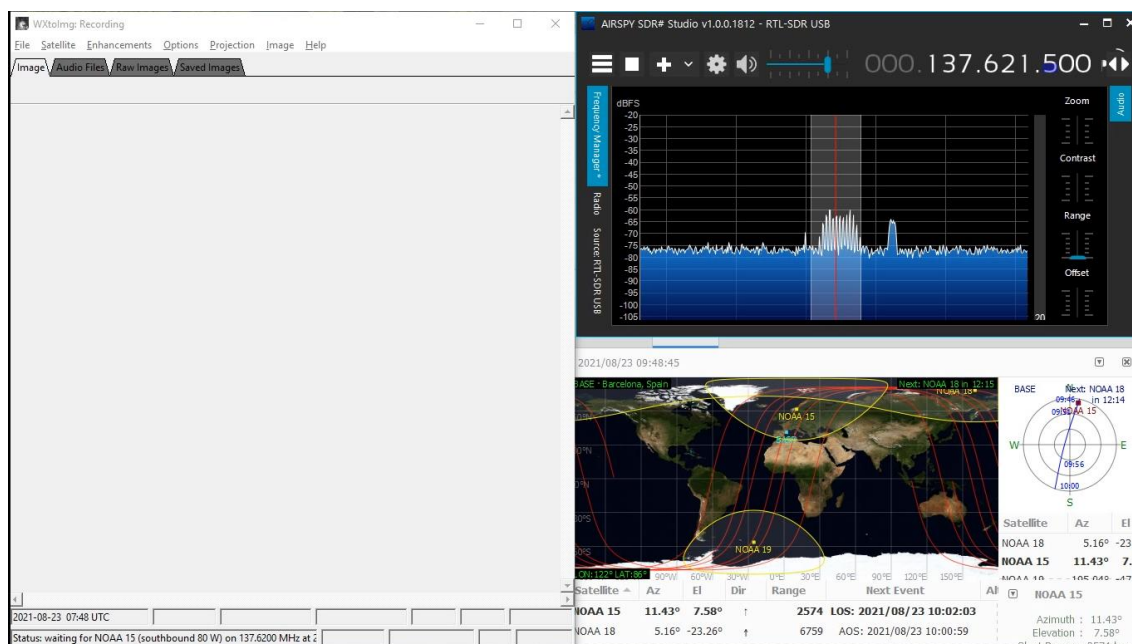


Fig. 3.40: WXtolmg (izquierda), SDR# (arriba) y Gpredict (abajo). Empieza a recibirse con claridad la señal del NOAA-15 cuando se encuentra a 7,58° de elevación. En breve WXtolmg empezará a grabar.

La señal se recibe con fuerza constantemente y llega al máximo SNR cuando el satélite alcanza a una elevación de 74° (prácticamente en el cenit). Debido a un problema con SDR# y/o WXtoImg, las líneas de la imagen pese a que se decodifican correctamente, quedan desplazadas (Fig.3.41). Se ha probado a reinstalar los dos programas (también en diferentes versiones) y realizar procesos calibración que incluyen los mismos programas, entre otros, pero persiste el problema. Por lo tanto, solo se tendrá en cuenta que las líneas se decodifiquen como indicador de buena señal, no su alineación.

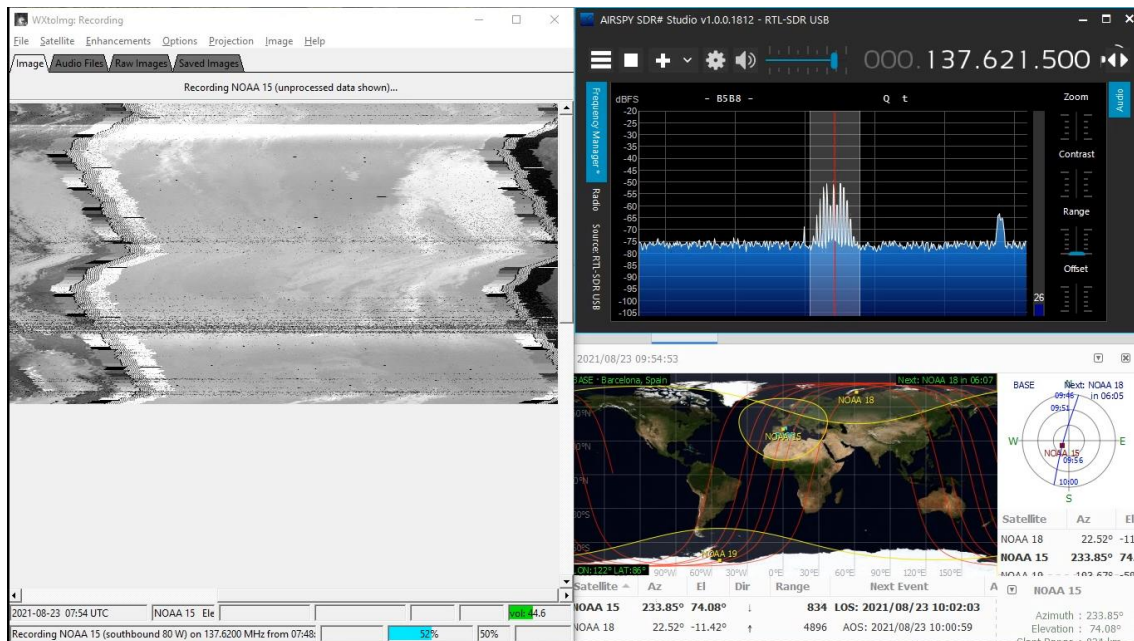


Fig. 3.41: Señal NOAA 15 con el mayor SNR, elevación 74° .

A continuación, la intensidad de la señal decrece junto con la elevación y deja de tener una SNR aceptable como para decodificar cuando el satélite alcanza los $8,15^{\circ}$ de elevación, WXtoImg ha dejado de grabar a los 9 grados (Fig.3.42).

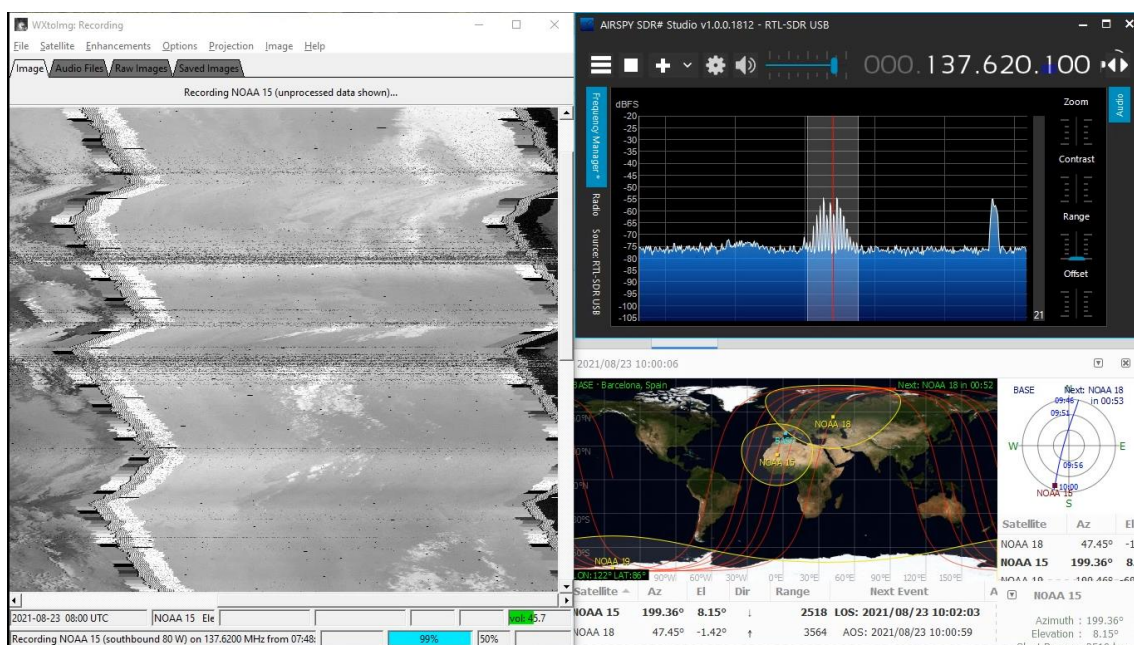


Fig. 3.42: Señal del satélite empezando a tener una señal poco aceptable a los $8,15^{\circ}$ de elevación.

El resultado de la prueba de la *Turnstile* ha sido satisfactorio, ya que la antena ha podido recibir de forma correcta la señal durante toda la pasada del NOAA. Incluso en las zonas de baja elevación la recepción ha sido buena, lo que indica que el diagrama de radiación de la antena no es demasiado direccional como para no cubrir esas zonas. Estos resultados de la prueba confirman que se ha conseguido diseñar e implementar de forma correcta una antena eficaz para recibir señales de satélites NOAA.

Esta pasada (si no existiese el problema de desplazamiento de las líneas), nos dejaría con una imagen que iría aproximadamente desde el sud de Noruega hasta la parte sud del desierto del Sáhara.

3.4 Instalación de la antena

3.4.1 Cableado Antena-Receptor

La antena está previsto que se instale en la azotea de uno de los edificios del campus. Es un lugar relativamente alto y donde no hay obstáculos alrededor, lo que asegurará una buena recepción de la señal de los satélites. La estación de tierra se situará en una sala cercana a la misma azotea, por lo que se deberá instalar un cable desde la azotea hasta dicha sala.

Para calcular las pérdidas que tendremos en el cable que va desde el receptor hasta la antena, necesitaremos saber la longitud del cable. En casos como el de este proyecto, en que personal externo ha realizado la tarea de instalar el cableado desde el receptor hasta la antena, es posible que no se sepa con precisión que longitud de cable se ha instalado ya que es difícil de medir mientras se introduce por los conductos. En este caso, se estimó que se utilizó una longitud aproximada de unos 20 metros de cable RG-223.

La medida de este cable se hará por reflectometría, para lo que se requiere que no exista ninguna carga en el extremo contrario al de la medida. Solo puede encontrarse en circuito abierto o cortocircuito.

En el caso de este proyecto la tirada del cable se hizo anterior a la colocación de la antena, así que no existe nada conectado al otro extremo del cable, encontrándonos en el caso de una línea de transmisión en circuito abierto.

La realización de esta medida, se basa en enviar un pulso mediante un generador de funciones, para seguidamente captar mediante el osciloscopio el pulso reflejado. El tiempo entre el pulso enviado y el rebote será el tiempo que tarda en ir y volver el pulso por la línea de transmisión.

Se tuvo que aplicar un circuito monoestable para poder reducir aún más la anchura de los pulsos generados por el generador de funciones utilizado, ya que si no se producirá solape entre el pulso incidente y el reflejado. El montaje para realizar la medida es el siguiente (Fig.3.43):

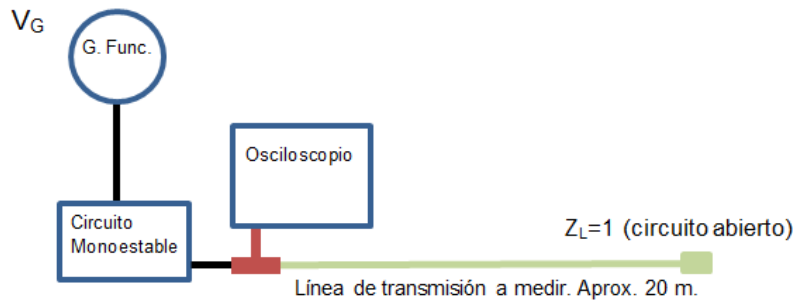


Fig. 3.43: Circuito para medir la longitud de una línea de transmisión por reflectometría.

Para obtener la longitud de cable, se hace uso de la expresión que relaciona el espacio con la velocidad y tiempo:

$$l = v \cdot t \quad (3.18)$$

La velocidad del pulso dentro del cable será la velocidad de la luz “c” multiplicada por el coeficiente de velocidad de propagación dentro del cable “Vp”:

$$l = (c \cdot Vp) \cdot t \quad (3.19)$$

Como tiempo entre el pulso incidente y el reflejado es el de ida y vuelta, lo dividimos entre 2 para tener solo el tiempo de ida. Multiplicándolo por la expresión anterior ya tenemos la expresión para obtener la longitud del cable:

$$l = (c \cdot Vp) \cdot \frac{t}{2} \quad (3.20)$$

Una vez realizado el montaje y encendido el equipamiento, si se ajusta debidamente el osciloscopio, se podrán ver el pulso incidente y el reflejado en la pantalla. Moviendo los cursores seleccionando los flancos de subida de los pulsos podremos obtener el tiempo entre ambos, el cual usaremos para obtener la longitud del cable.

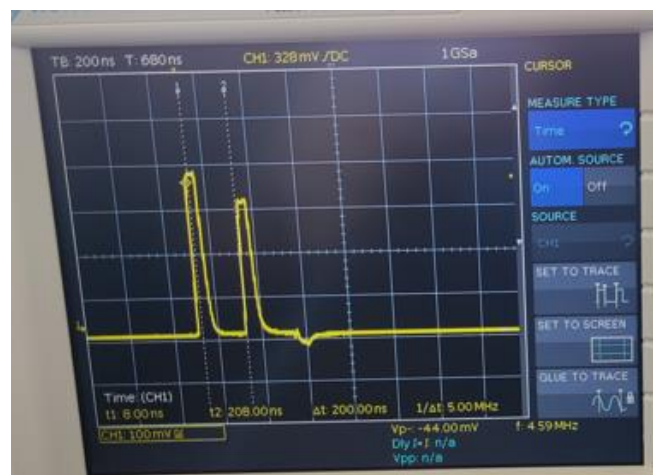


Fig. 3.44: Pulso incidente (izquierda) y reflejado (derecha)

En el caso de este proyecto, se ha obtenido un $t = 200\text{ns}$ entre pulsos. Ya se tienen todos los datos para introducir en la ecuación 3.20 y obtener la longitud del cable instalado:

$$l_{cab} = (3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 0,66) \cdot \frac{200 \cdot 10^{-9} \text{ s}}{2} = 19,8 \text{ m} \quad (3.21)$$

Se obtiene que la longitud del cable instalado es de 19,8 m, cercano a la medida aproximada de 20 m aportada por el instalador.

Ahora que ya se tiene la longitud se podrá obtener la atenuación a partir de la siguiente expresión (3.22):

$$At = l \cdot at \quad (3.22)$$

Según la ficha de características del RG-223 (Anexo A.1), se obtiene que la atenuación del cable es de 0,166 dB/m.

- Atenuación la tirada de cable de 19,8m:

$$At_{cab} = l_{cab} \cdot at = 19,8m \cdot 0,166 \text{ dB/m} = 3,29dB \quad (3.23)$$

- Atenuación de los 4 metros del cable unido a la antena:

$$At_{ant} = l \cdot at = 4m \cdot 0,166 \text{ dB/m} = 0,664dB \quad (3.24)$$

- Atenuación total:

$$At_{TOTAL} = At_{cab} + At_{ant} = 3,29dB + 0,664 \text{ dB} = 3,95dB \quad (3.25)$$

Se obtiene que la atenuación debido a la longitud del cable desde la antena hasta el receptor será de 3,95dB.

3.4.2 Instalación de la Antena

Debido a cuestiones relacionadas con seguridad física y responsabilidades no fue posible acceder a la azotea para instalar la antena. Hasta que no se apliquen medidas que corrijan esto no se espera que esta pueda ser instalada.

En su lugar se colocará una antena más pequeña en la repisa de la ventana de la sala donde estará situada la estación de tierra. Esta antena será un dipolo en V. La ubicación de la misma no es ideal (debido a que sólo ve una pequeña fracción de cielo al estar rodeada de edificios), pero será suficiente para probar el funcionamiento de la estación de tierra que se diseñará y construirá en el próximo capítulo.

CAPÍTULO 4. ESTACIÓN DE TIERRA AUTÓNOMA RECEPTORA

4.1 Características necesarias en la estación de tierra

Uno de los principales objetivos de este proyecto consiste en el diseño y construcción de una estación de tierra que sea capaz de capturar de forma automática (sin intervención de una persona) las imágenes transmitidas por los satélites NOAA en cada pasada, y almacenar dichas imágenes en su memoria, que posteriormente podrán ser consultadas y/o descargadas de forma local, o remota (si se dispusiese de conexión a internet).

En cuanto a sus características, esta estación de tierra debe tener un tamaño reducido, un peso ligero y ser robusta, para poder ser transportada. Además ha de ser sencilla y rápida de instalar (minimizar cableado y conexiones), ha de ser resistente a la intemperie y ha de poder funcionar autónomamente sin conexión a internet, con el objetivo de que pueda desplegarse o instalarse en cualquier lugar, únicamente disponiendo de alimentación (ya sea mediante conexión a la red eléctrica o a una batería). El consumo de electricidad ha de ser reducido.

4.2 Componentes necesarios e implementación

4.2.1 Ordenador

El ordenador que se ha decidido utilizar para esta estación es una Raspberry PI 4, con el sistema operativo *Raspbian*. Su reducido tamaño y bajo peso, su *software* de código abierto, la alimentación a 5V que hace que se pueda alimentar mediante una *Power Bank* o un enchufe USB de 5V en un vehículo, su bajo consumo (máximo 15W) además de sus buenas capacidades y reducido coste hacen que sea la opción ideal para este proyecto.

En concreto se ha elegido la versión Raspberry PI4 de 4GB de RAM (Fig.4.1) en un kit que incluye: Placa PI 4, carcasa de plástico, ventilador para refrigeración, disipadores adhesivos, tarjeta micro SD de 64GB (memoria del ordenador), alimentador de 5V 3A USB tipo C, cables HDMI, entre otros.



Fig. 4.1: Raspberry PI 4

4.2.2 Receptor SDR

El receptor se decidió que fuese un *dongle* SDR debido a su menor tamaño y coste. En concreto se eligió el RTL-SDR V3 (Fig.4.2), que es una versión mejorada de los *dongle* SDR que se utilizaban para ver la DVB-T. Entre las

mejoras se encuentran: un *front end* mejorado para mayor SNR a altas frecuencias, cambio del conector MCX por un SMA (más robusto), posibilidad de *bias-tee* controlado por *software* (para alimentar amplificadores en CC a través del mismo coaxial que va a la antena), un cristal oscilador compensado por temperatura (evita desplazamientos de las frecuencias por cambios de temperatura), carcasa de aluminio (para mayor robustez, mejor refrigeración y apantallar posibles interferencias), entre otros.



Fig. 4.2: Dongle RTL-SDR v3

4.2.3 Reloj horario externo

Debido a que las placas Raspberry PI obtienen la hora de internet al arrancar, y no poseen un reloj de tiempo real integrado o RTC (real time clock) que mantenga la hora mientras esta se encuentra sin alimentar, si la arrancamos en un lugar sin conexión a internet, la hora será incorrecta.

Esto presenta un problema en este proyecto ya que las pasadas de los satélites se predicen según la hora actual que tiene la Raspberry, por lo que si esta hora es incorrecta las predicciones serán incorrectas también y no decodificaremos ninguna imagen.

Por ello se ha de instalar un módulo RTC externo que se encargue de conservar la hora cuando no exista alimentación (normalmente incorporan una pila o batería para ello).

El módulo RTC que se ha decidido instalar es el RTC DS1307 (Fig.4.3), que debe su nombre al chip DS1307. Este módulo hace de reloj y de calendario. La comunicación con el mismo se hace mediante bus I2C por lo que solo son necesarias las conexiones SDA (Serial Data) y SCL (Serial Clock). En funcionamiento normal se alimenta a 5V y cuando detecta pérdida de alimentación cambia a la fuente de corriente de reserva, una pila de botón de 3V (por ejemplo una CR2032), en este modo consume menos de 500 nA. Tiene un tamaño reducido y un coste muy económico.

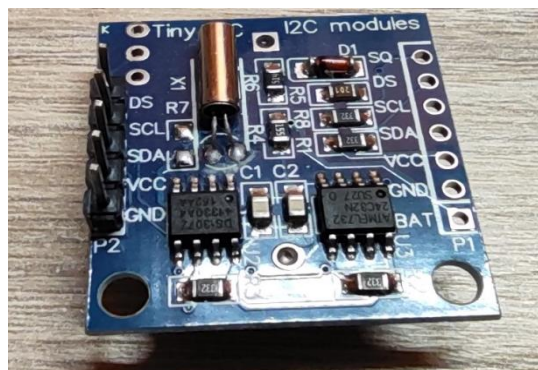


Fig. 4.3: Módulo RTC DS1307

4.2.4 Conexión y alimentación

La caja estanca tendrá diferentes conexiones para poder funcionar:

- Alimentación a 5V:

Para alimentar la Raspberry PI con 5 V 3A procedentes de una fuente. Existirán 2 puertos, interconectados entre sí:

- Conector tipo *barrel* 5,5x2,1mm:
Para conexiones en interiores o no expuestas a la intemperie. Permite una conexión con conectores estándar, sencilla y rápida. El conductor exterior es el negativo y el central el positivo. Cuenta con un tapón de goma para cuando no se hace uso del puerto, que se extiende por detrás del conector (Fig.4.4). Mientras se está utilizando el puerto no es impermeable.



Fig. 4.4: Puertos *barrel* 5,5 x 2,1mm con tapa de goma.

- Conector SP13 IP68 de 2 polos:
Para conexiones en exteriores o zonas expuestas a la intemperie. La conexión es más lenta ya que además es roscada, pero es completamente impermeable. Cuenta con múltiples juntas de goma para asegurar la estanqueidad. El puerto cuenta con un tapón roscado para cuando no se hace uso del conector (Fig.4.5). El conductor 1 es la masa y el 2 el positivo.



Fig. 4.5: Conector y puerto SP13 impermeable de dos polos.

- Interruptor ON/OFF:
Para apagar y encender la estación con facilidad, conmuta ambos puertos ya que están interconectados. De este saldrá un conector USB-C para alimentar la Raspberry PI. Se trata de un interruptor redondo, con una junta de estanqueidad por detrás para impedir la entrada de agua (Fig.4.6). El botón tiene retroiluminación de color naranja para indicar que la estación se encuentra encendida.



Fig. 4.6: Interruptor impermeable con retroiluminación.

- Conexión de red, RJ-45:

Para poder conectarse a la estación de tierra en local o conectarla a internet cuando no existe conexión WI-FI. Se ha optado por un conector RJ-45 estanco tipo pasamuros (Fig.4.7). El conector cuenta con un tapón de goma que se extiende por la parte trasera del mismo que lo protege cuando no se está utilizando. Mientras se usa este puerto no es impermeable.



Fig. 4.7: Pasamuros impermeable con conector RJ-45 hembra por delante y detrás.

- Conexión antena, SMA:

Para poder conectar el cable que proviene de la antena al receptor SDR. El conector SMA será el del propio *dongle* RTL-SDR (Fig.4.8), ya que tiene longitud suficiente. El conector SMA es impermeable cuando está conectado.



Fig. 4.8: Conexión SMA dongle RTL-SDR v3.

4.2.5 Caja estanca

Para que los componentes mencionados en apartados anteriores estén protegidos, se alojarán en una caja estanca similar a las utilizadas en instalaciones eléctricas. Esta caja tiene que ser lo suficientemente grande como para poder dar cabida a todos los componentes y cableado que los une, dejando también espacio para poder manipularlos.

Para este proyecto se eligió una caja de dimensiones 160x135x83 mm, de material ABS resistente (Fig.4.9). En la tapa incorpora una junta de goma perimetral para mejorar la estanqueidad contra el agua y el polvo, además de cuatro cierres rotatorios en cada esquina. Es totalmente lisa y plana tanto en interior como exterior (no encontramos los típicos conos de goma) lo que facilitará la buena fijación de las diferentes conexiones al ser superficies rígidas.



Fig. 4.9: Caja estanca que alojará los componentes de la estación de tierra.

A la caja se le realizaron una serie de modificaciones para la instalación de los puertos y pasamuros (Fig.4.10). Se decidió colocar todos los conectores en una única cara de la caja, ya que en una cara había espacio más que suficiente para colocar los puertos, habría únicamente una cara “vulnerable” en caso que se tenga que transportar, además así ocuparía menos espacio si se tuviese que colocar en una esquina.

Primero se realizó la medida mediante un pie de rey de las dimensiones de los diferentes puertos para saber el tamaño del agujero que se tendría que hacer para cada componente, luego se midió el tamaño que ocuparía cada puerto en la cara exterior de la caja para así poder distribuirlos de la forma correcta, también se tenía que tener en cuenta interconexiones entre los puertos (por ejemplo, los dos puertos de alimentación están puenteados entre sí y luego van al interruptor).

Para ello se tomaron medidas de la zona útil de la cara lateral menor de la caja y plasmaron en un dibujo junto con las secciones que ocuparía cada componente, buscando que estuviesen equitativamente distribuidos para que pudiesen realizarse las conexiones de forma cómoda. También se tuvo en cuenta el espacio interior que ocuparían los diferentes puertos para que hubiese suficiente espacio.

Seguidamente se pudo pasar a colocar una cinta de papel sobre la cara donde irían los componentes, y se marcaron en esta la posición de los mismos, para posteriormente realizar los taladros. Una vez realizados estos se fue comprobando el ajuste de los puertos, se realizaron las modificaciones necesarias y se lijaron los bordes para dejar un acabado suave.

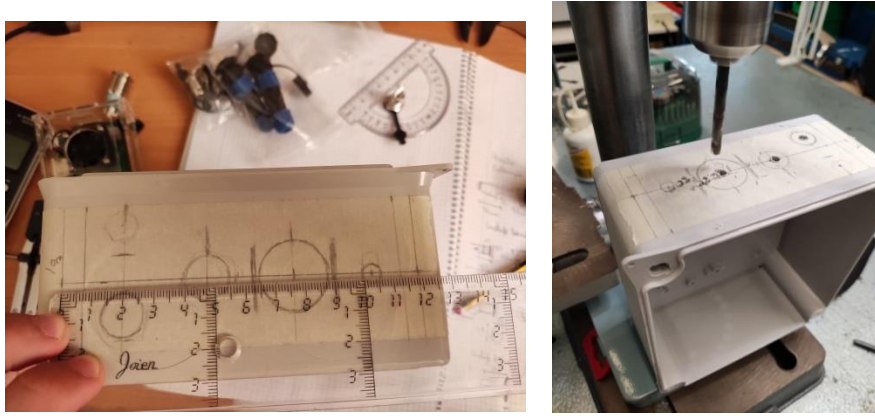


Fig. 4.10: Mecanizado de la caja estanca.

A continuación, se apretaron definitivamente las tuercas interiores de los puertos (Fig.4.11) (para ello se usaron vasos para tuercas hexagonales de diferentes tamaños) y se atornillaron los tornillos del pasamuros de RJ-45.



Fig. 4.11: Fijación de los puertos.

En cuanto a conexiones soldadas, se puentearon ambos conectores de alimentación y se hizo pasar ambos polos por el interruptor para alimentar la luz de indicación de ON cuando este estuviese cerrado (Fig.4.12). A través de este interruptor se conmuta el polo negativo para cortar o dar alimentación a un conector USB-C ensamblable (Fig.4.13), que alimentará la Raspberry. Por último todos los conductores expuestos son cubiertos con aislante líquido.

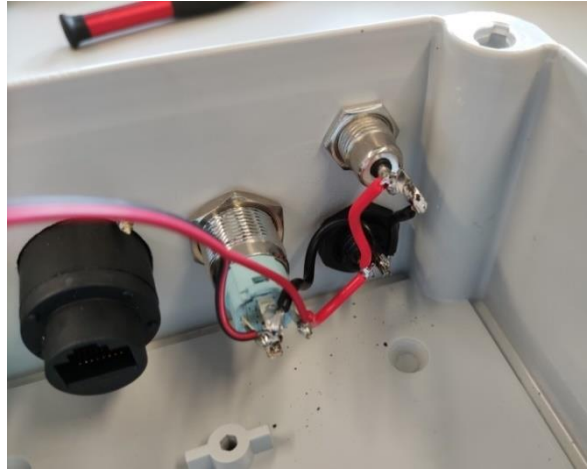


Fig. 4.12: Conexionado soldado.

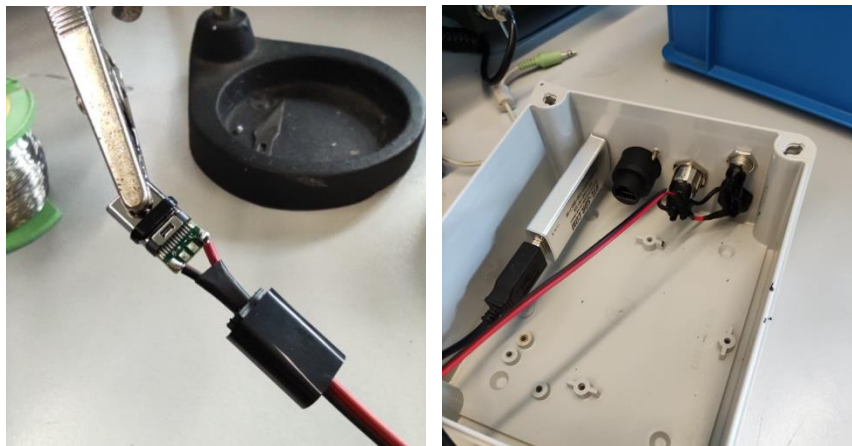


Fig. 4.13: USB-C ensamblable (izquierda) y conductores de los puertos aislados (derecha).

En cuanto a conexiones no soldadas, se elaboró un latiguillo de cable de red de 30 cm para llegar del pasamuros RJ-45 hasta la Raspberry, y se colocó un latiguillo USB para llegar desde el RTL-SDR hasta la Raspberry (Fig.4.14). Se realizaron estas últimas conexiones, se organizaron los cables, se verificó el correcto funcionamiento y conectividad de todos los puertos y por último se cerró la tapa (Fig.4.15), quedando funcionando la estación.



Fig. 4.14: Conexionado final dentro de la caja.



Fig. 4.15: Estación de tierra ya terminada y verificada.

4.3 Scripts

En este proyecto todo el proceso de recepción y decodificación de imágenes está gobernado por *scripts*.

Los *scripts* son archivos ejecutables que contienen instrucciones en forma de comandos para realizar un proceso o procesos de forma autónoma. Al intérprete de estos comandos se le llama Shell (por ello estos archivos tienen la extensión “.sh”), en nuestro caso usaremos el intérprete Bash (Bourne-again Shell).

La estación de este proyecto se basa en tres *scripts* para funcionar. Los cuales se describen en el Anexo A.4.

4.4 Operación local y remota

A la estación de tierra se puede acceder principalmente para:

- Enviar comandos: desde un cliente SSH (Secure Shell) como es el *software* libre Putty (Fig.4.16). Esto nos permite configurar la Raspberry de la estación de tierra sin necesidad de conectar un monitor, ni estar físicamente si tenemos una conexión remota.

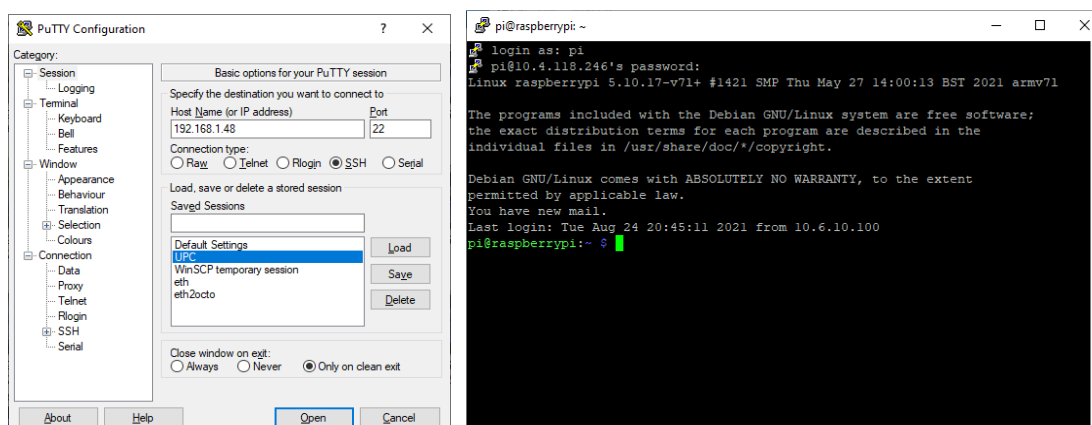


Fig. 4.16: Ventana configuración de Putty (izquierda) y su consola de comandos (derecha).

- Acceder a los archivos guardados: mediante un cliente SFTP (Secure File Transfer Protocol) como es el *software* libre WinSCP, que nos permite modificar, descargar y subir archivos a la memoria de la Raspberry. Esto nos permite, por ejemplo, ver o descargar las imágenes de las pasadas de los NOAA que se hayan decodificado (Fig.4.17).

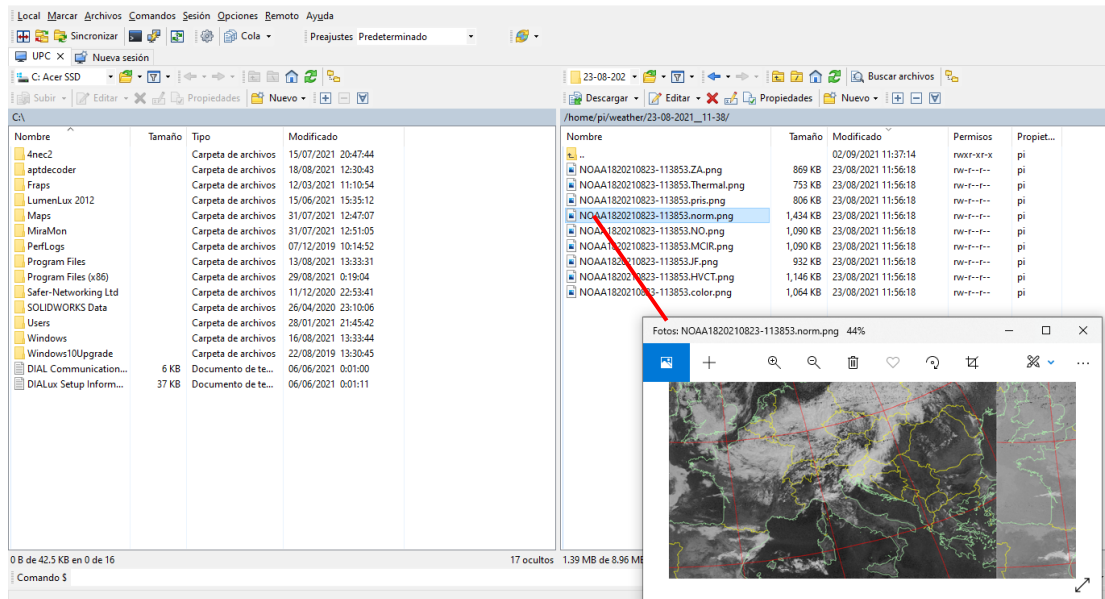


Fig. 4.17: Ventana WinSCP con cliente (izquierda) y servidor (derecha).

Tanto Putty como WinSCP, solo es necesario que estén instalados en el PC cliente.

Podemos acceder de manera local o remota a la estación de Tierra:

- Acceso local: Se puede acceder tanto conectando la Raspberry a una LAN, como conectándola directamente con un cable de red a un PC (en el PC será necesario instalar un *software* que asigne una IP estática a la Raspberry para poder acceder a esta, como el *software* *DHCPserver*).
- Acceso remoto: requiere de una VPN (Virtual Personal Network) o un *software* de acceso remoto para podernos conectar a la Raspberry. En este proyecto se utilizó tanto la VPN de la escuela, UPCLink; como el *software* *remote.it* el cual permite conectarse remotamente a la Raspberry independientemente de su ubicación, siempre que esta tenga conexión a internet (*remote.it* debe estar instalado tanto en la Raspberry como en el PC cliente).

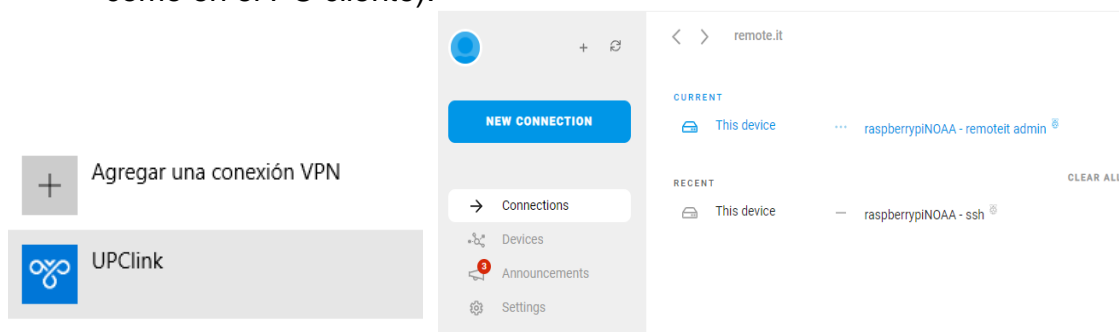


Fig. 4.18: VPN y *software* de conexiones remotas *remote.it*, dos formas de conectarse remotamente.

4.5 Esquema de funcionamiento de la estación y software

El siguiente esquema describe el funcionamiento de la estación de tierra, con todos los componentes y software implicado

ESTACIÓN DE TIERRA

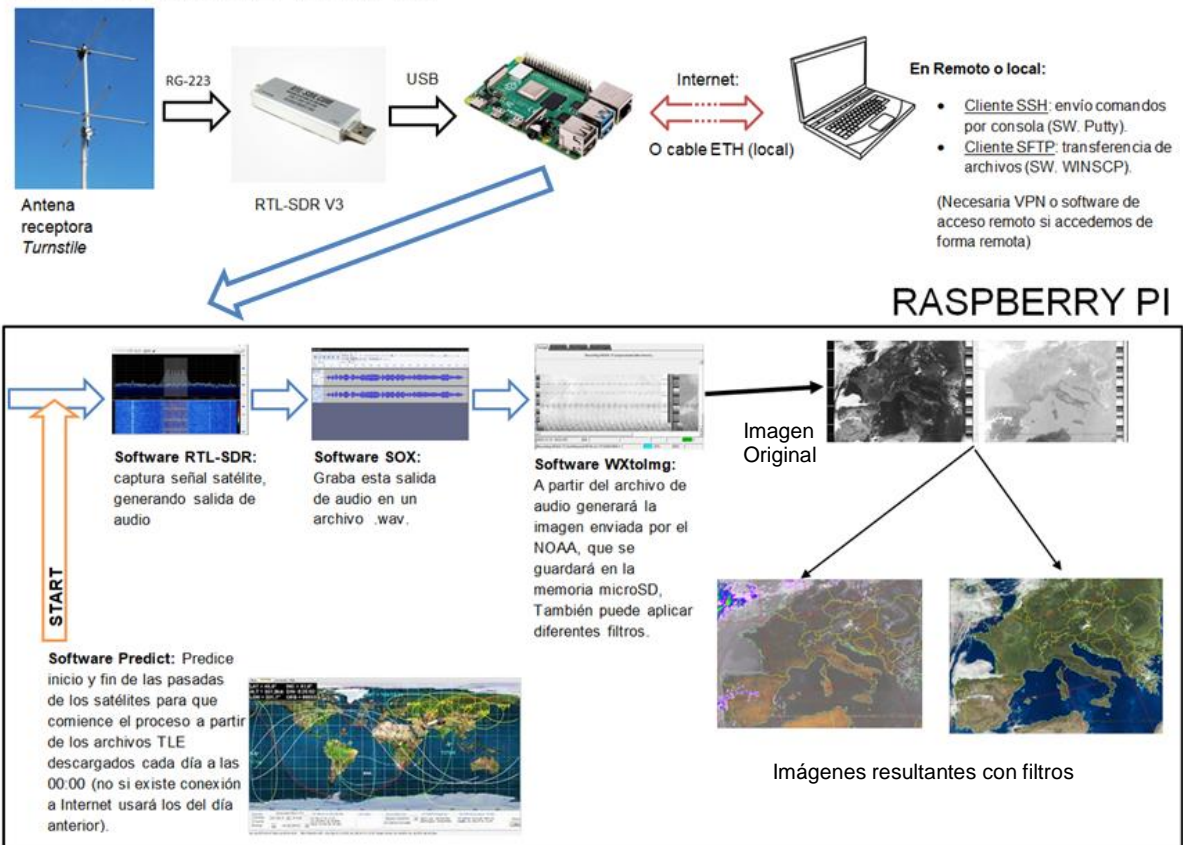


Fig. 4.19: Esquema del proceso de recepción de imágenes en la estación de tierra autónoma

4.6 Despliegue

La estación se diseñó para ser simple, fácil y rápida de desplegar (Fig.4.15). Para poner en servicio la estación requiere de las siguientes acciones:

- Conectar la antena al puerto SMA.
- Conectar alimentación a 5V a través de uno de los 2 puertos y apretar el interruptor de encendido.

Si se quiere conectar la estación de tierra a internet a una red WI-FI no configurada se debe modificar el archivo `wpa_supplicant.conf`, con los datos de esa red.

```
sudo nano /etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf
```

En caso de que se quiera conectar a una red por cable, simplemente será necesario conectar la estación a la roseta y que el administrador de IP nos proporcione una.



Fig. 4.20: Estación de tierra con todas las conexiones realizadas, encendida y lista para funcionar.

4.7 Desempeño de la estación

Tras el funcionamiento constante de la estación durante el mes de Agosto y principios de Septiembre, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La estación de tierra funcionó ininterrumpidamente, sin necesidad de ejecutar reinicios debido a que la misma quedase bloqueada.
- La Raspberry pese a estar en una caja cerrada junto al RTL-SDR (el cual también irradia calor) no tuvo problemas de sobrecalentamiento. Esto se supervisó enviando comandos para obtener la temperatura de forma periódica, la temperatura máxima alcanzada por la placa fue de 53,5°C, esto fue en pleno mes de Agosto en un aula sin refrigerar. La temperatura operativa de la Raspberry PI es de -40°C a 85°C, así que estamos lejos del sobrecalentamiento, además todavía se podría aumentar la velocidad del ventilador, ya que durante todo el tiempo estuvo a mínima velocidad.
- Se realizó la prueba de desconectar de Internet y de la alimentación la estación durante unos minutos, para luego volver a conectarla únicamente a la alimentación, con el fin de comprobar si el reloj RTC externo era capaz de mantener la hora y la estación conseguía obtener las pasadas. La estación superó la prueba.
- Se probó a alimentar la estación con una alimentación de 5V 2A, menor a la recomendada. La estación pudo obtener las imágenes de las pasadas sin problema. De esto se deduce también que su consumo es inferior a 10W.
- Se pudieron enviar comandos a través de SSH y acceder a los archivos mediante SFTP sin ningún tipo de corte en la conexión o bloqueo. La velocidad de descarga de imágenes en remoto es de unos 1,5Mbps (depende de la red).

Para ilustrar las capacidades de la estación implementada, en el Anexo A.5 se encuentran imágenes captadas por la misma, correspondientes al fenómeno meteorológico DANA (Depresión Aislada a Niveles Altos) que el día 1 de Septiembre 2021 azotó la Península Ibérica.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Este tipo de estación de tierra podría ser de ayuda para mejorar las predicciones en países en desarrollo en los que se produzcan fenómenos meteorológicos violentos como tifones, huracanes o inundaciones. O en zonas en las que no exista conexión a Internet u otras vías para obtener información meteorológica como en medio del océano o en lugares aislados.

El Analizador de Redes ha resultado muy útil a la hora de implementar la antena, pues si se hubiese construido esta antena “a ciegas” sin usar el analizador, no se sería consciente de la pérdida en la eficiencia en la recepción de la antena por las diferencias en los valores teóricos y los reales de la frecuencia de resonancia de la antena; ni se estaría seguro de haber realizado el proceso correctamente, con el análisis del resto de parámetros que este arroja. Durante la búsqueda de información, en Internet se puede ver mucho el recurso de acoplar amplificadores a antenas que han estado construidas sin ningún tipo de análisis instrumental posterior, aumentando la complejidad del sistema receptor; cuando con una antena adecuada para el propósito, en una buena ubicación y bien adaptada también se puede obtener un buen resultado además que se elimina un punto de fallo, como se ha podido demostrar.

Esta estación se ha diseñado para trabajar con APT en VHF, pero como se ha visto, este protocolo de transmisión solo existirá durante el tiempo que aguanten en servicio los NOAA-POES de quinta generación, los cuales podrían continuar funcionando años o incluso décadas.

En un futuro, la estación se podría adaptar para la recepción de imágenes otro tipo de satélites ya existentes o a los nuevos protocolos de alta definición como el HRD de los JPSS. Realmente, se puede adaptar para recibir prácticamente cualquier señal, no teniendo por qué ser de satélite. Al ser SDR, las posibilidades son muy grandes, o dicho de otra manera (haciendo alusión al acrónimo) las posibilidades son “definidas por software”.

CAPÍTULO 6. REFERENCIAS

- [1] NASA, "NASA - NSSDCA - Master Catalog - Spacecraft Query." <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/SpacecraftQuery.jsp>.
- [2] R.C.A., *TIROS WEATHER SATELLITE PROGRAM 1960s R.C.A. FILM FOR NASA 45164*. 1960.
- [3] H. J. Kramer, "Observation of the earth and its environment: survey of missions and sensors." Springer, Berlin, etc, 2002.
- [4] J. Graumann, A. Robel, and et al., "NOAA KLM USER'S GUIDE with NOAA-N, N Prime, and MetOp SUPPLEMENTS," no. August 2014, p. 2530, 2014, [Online]. Available: [https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/satellite/publications/podguides/N-15 thru N-19/pdf/0.0 NOAA KLM Users Guide.pdf](https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/satellite/publications/podguides/N-15%20thru%20N-19/pdf/0.0%20NOAA%20KLM%20Users%20Guide.pdf).
- [5] N. OSPO, "POES Operational Status - POES Status - OSPO." 2019, [Online]. Available: <https://www.ospo.noaa.gov/Operations/POES/status.html>.
- [6] "JPSS Operational Status - JPSS Status - OSPO." <https://www.ospo.noaa.gov/Operations/JPSS/status.html> (accessed Aug. 29, 2021).
- [7] "Joint Polar Satellite System." https://www.jpss.noaa.gov/mission_and_instruments.html (accessed Aug. 29, 2021).
- [8] Dr. T.S. Kelso, "NORAD Two-Line Element Set Format," Dec. 29, 2019. <https://www.celestrak.com/NORAD/documentation/tle-fmt.php> (accessed Aug. 29, 2021).
- [9] N. O. and A. A. Oceanic, "User ' s Guide for Building and Operating Environmental Satellite Receiving Stations," *Earth*, no. February, 2009.
- [10] A. T. N. Z. Limited, "Wxtoimg(GUI) User Manual," vol. 0. 2004.
- [11] L. B. Cebik, "The Turnstile An Omni-Directional Horizontally Polarized Antenna," *AnteneX*, Jun. 2000, Accessed: Aug. 28, 2021. [Online]. Available: <http://www.antentop.org/w4rnl.001/turns.html>.
- [12] R. W. Hollander, "Resonant Quadrafilar Helical Antenna," 1999.
- [13] B. Vera Navides, "Diseño y construcción de una antena cuadrifilar helicoidal para recepción de imágenes transmitidas por satélites de órbita polar," 2012.
- [14] I. Brugnera, "Ricezione METEOSAT satelliti WXSAT NOAA con Yaesu FT-897 WXtoIMG NOAA-15, 17, 18, 19." <http://www.radioamatoripeligni.it/i6ibe/pdf/noaa897.pdf>.
- [15] I. Brugnera, "Particolari costruttivi della TURNSTILE." <http://www.radioamatoripeligni.it/i6ibe/turnhard/turnhard.htm> (accessed Sep. 05, 2021).
- [16] Jimmy Carter, "432 MHz Axial Mode Turnstile," Jun. 27, 2017. <https://kg4sgp.com/posts/2017-06-27-432MHz-axial-mode-turnstile.html> (accessed Aug. 28, 2021).
- [17] Koax24.de and Arnotec, "RG 223 U Datasheet." p. 605710, 2000.
- [18] Koax24.de and Arnotec, "Rg 59 BU Datasheet." p. 605710, 2000.

ACRÓNIMOS

AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer

APT: Automatic Picture Transmission

ATN: Advanced TIROS-N

ESSA: Environmental Science Services Administration

IR: Infrarrojo

HRPT: High Resolution Picture Transmission

LEO: Low Earth Orbit

MEL: Maximum Elevation

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

POES: Polar Orbital Environmental Satellite

QFH: Cuadrifilar Helix

ROE: Relación Onda Estacionaria

SARSAT: Search and Rescue Satellite-Aided Tracking

SDR: Software Defined Radio

SFTP: Secure File Transfer protocol

SSH: Secure Shell

SST: Sea Surface Temperature

SW: Software

SWR: Standing Wave Ratio

TIROS: Television Infrared Observation Satellite

TLE: Two-Line Element

VRA: VHF Real Time Antenna

CAPÍTULO 7. ANEXOS

A.1. Características del cable RG-223 y RG-59

RG-223.[17]	
Impedancia Característica	50Ω
Atenuación a 150MHZ	0.166dB/m
Capacitancia	100pF/m
Velocidad de propagación	0.66
Conductor interno	Sólido
Material conductor interno	Hilo de Cobre Plateado
Material dieléctrico interior	Polietileno
Material malla pantalla	Hilo de Cobre Plateado
Material Cubierta Exterior	PVC
Temperatura de funcionamiento	-30°C a +80°C
Precio	Desde 1,40€/m



Fig. 7.1: Cable RG-223.

RG-59.[18]	
Impedancia Característica	75Ω
Atenuación a 150MHZ	0.124dB/m
Capacitancia	67pF/m
Velocidad de propagación	0.66
Conductor interno	Sólido
Material conductor interno	Hilo de Cobre
Material dieléctrico interior	Polietileno
Material malla pantalla	Hilo de Cobre
Material Cubierta Exterior	PVC
Temperatura de funcionamiento	-30°C a +70°C
Precio	Desde 0,60€/m



Fig. 7.2: Cable RG-59

A.2. Calibración de un Analizador de Redes

Primero se selecciona el ancho de banda en que se va a trabajar (de 100MHz a 150MHz o 100 a 200MHz, ya que se estará en torno a 137 MHz) Debido a que solo se quiere medir el parámetro S11, la calibración constará de tres pasos:

- Calibración en circuito abierto (OPEN):
Al equipo se le indica lo que es para él un circuito abierto. Para ello se conectará el elemento etiquetado como OPEN (que en sí es un circuito abierto), se verá como la medida del parámetro S11 en la escala logarítmica permanece en 0 dB, debido a que la señal enviada, al ser un circuito abierto, vuelve de nuevo al equipo como salió, pero sin ninguna atenuación. Una vez se vea esto se podrá pulsar el botón “calibrar”.



- Calibración en cortocircuito (SHORT):
Al equipo se le indica lo que es un cortocircuito. Para ello se conectará el elemento etiquetado como SHORT (que en sí es un cortocircuito), se verá como el parámetro S11 en la escala logarítmica se mantiene en 0dB, debido a que la señal enviada, al ser un cortocircuito, vuelve de nuevo al equipo con signo inverso a como salió, pero sin ninguna atenuación. Una vez se vea esto se podrá pulsar el botón “calibrar”.



- Calibración en carga (LOAD):
Al equipo se le indica lo que es una carga de 50Ω (se usan 50Ω que es la impedancia característica del circuito con el que se trabaja). Para ello se conectará el elemento etiquetado como LOAD (que en sí es una carga de 50Ω), se verá como el parámetro S11 en la escala logarítmica desciende hasta el fondo de escala (50dB o más), debido a que la señal enviada, al pasar por una carga de 50Ω perfecta, vuelve muy atenuada

al equipo. Una vez se vea esto se podrá pulsar el botón “calibrar”. Si se selecciona el modo de visualización de “Carta de Smith” se verá que el cursor se encontrará en la mitad de la cara para todas las frecuencias, pues se trata de una carga perfecta.



Siguiendo este procedimiento el equipo estará correctamente calibrado y se podrán tomar medidas a través del puerto calibrado.

A.3. Modificaciones módulo RTC DS1307

Al módulo RTC se le tuvieron que realizar dos modificaciones para asegurar su correcto funcionamiento:

- Eliminar resistencias pull-up R3 y R2:
Debido a que en la Rasperry PI 4 las resistencias de pull-up del bus I2C van a 3.3V y en el RTC a 5V, deberán eliminarse las resistencias de pull-up del RTC (R2 y R3) para que el bus I2C quede a 3,3V para ambos, pues solo existirán las de la Rasperry.
- Eliminar D1, R4 y puentear R6:
Estos módulos RTC incluyen un circuito de recarga de la batería de *backup* para recargar dicha batería cuando el reloj está alimentado a 5V. Debido a que la pila CR2032 que se utiliza no es recargable (pues las recargables son difíciles de encontrar y más costosas), el circuito de carga está intentando recargar una batería que no lo es, lo que puede llegar a dañarla, además que el resistor R4 contribuye a su descarga. Por ellos se ha decidido suprimir este circuito, eliminando el diodo D1, R4 y puentear R6.

Estas modificaciones es recomendable realizarlas con la pila de *backup* desconectada, para evitar cortocircuitos en la placa al desoldar los componentes.

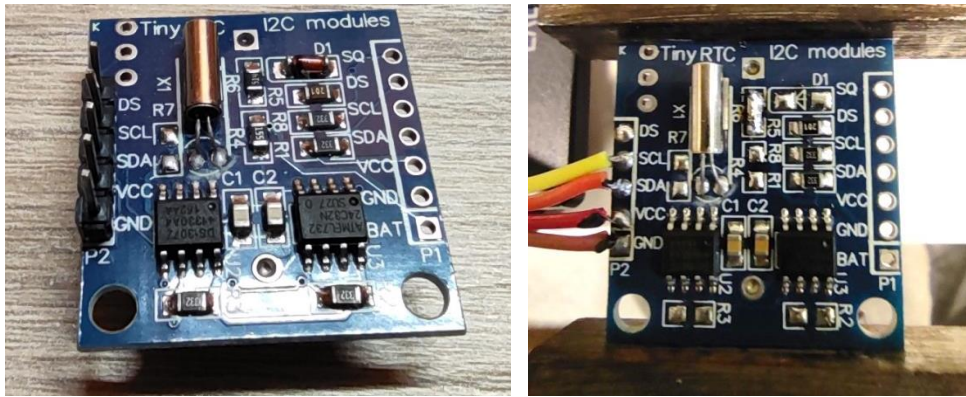


Fig. 7.3: Módulo RTC antes y después de las modificaciones

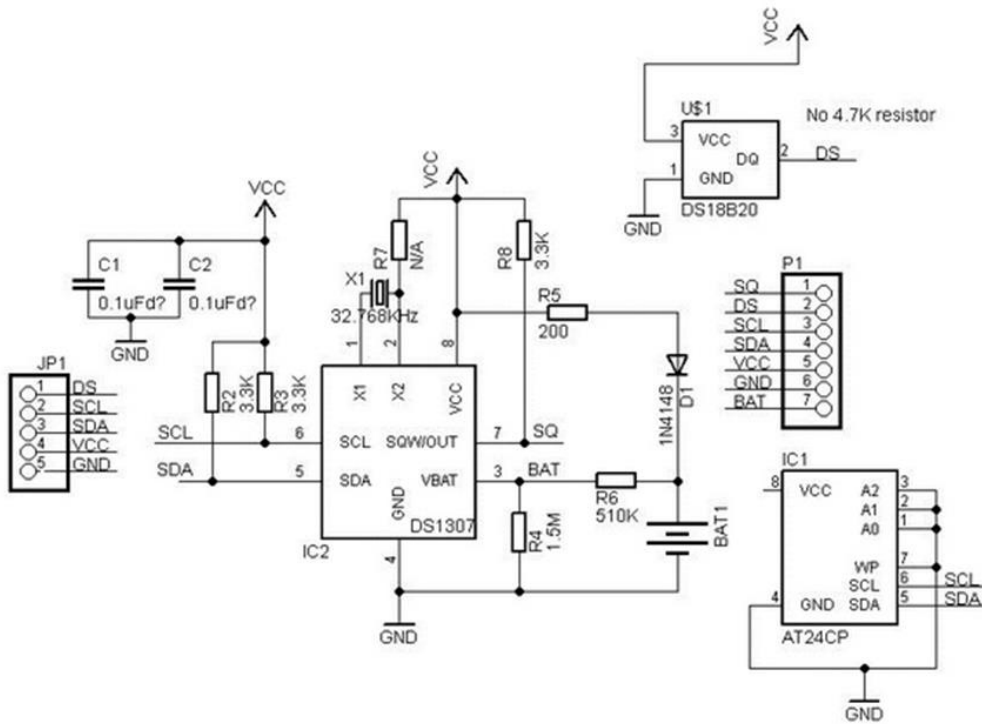


Fig. 7.4: Esquema eléctrico del DS1307

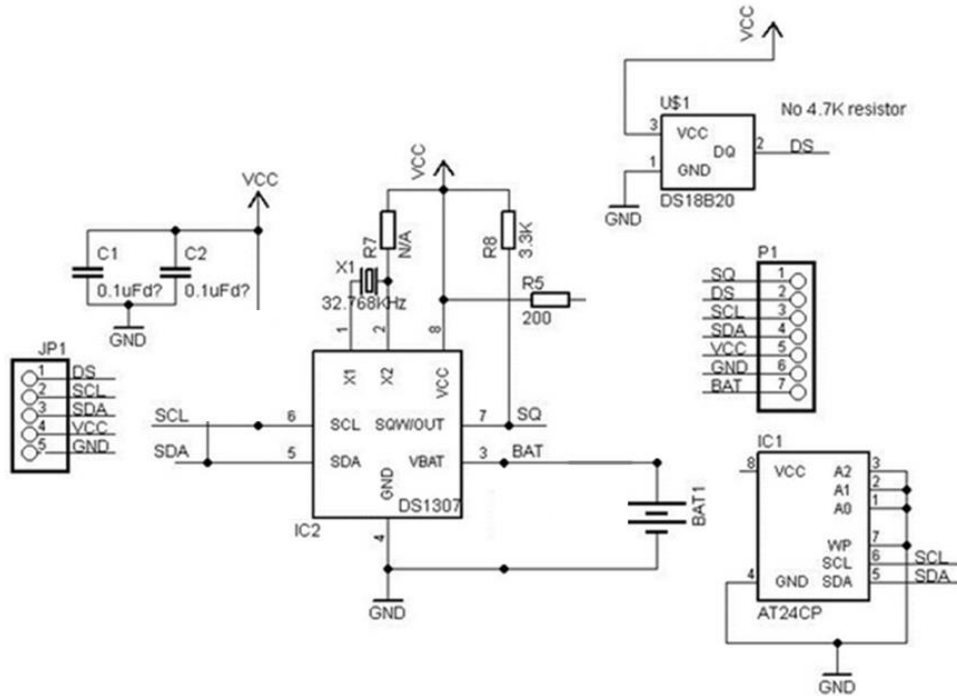


Fig. 7.5: Esquema eléctrico del DS1307 con las modificaciones realizadas.

Mediante el software de diseño en 3D *Solidworks* se diseñó una caja para alojar el RTC con el fin de que estuviese protegido. Una vez diseñado se imprimió mediante una impresora 3D con filamento PLA (ácido poliáctico) de color negro.

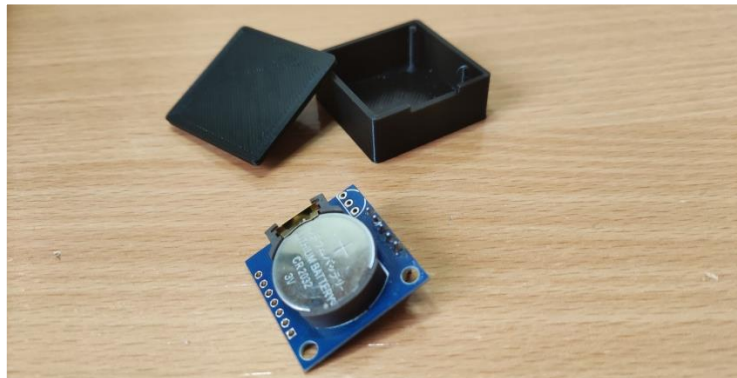
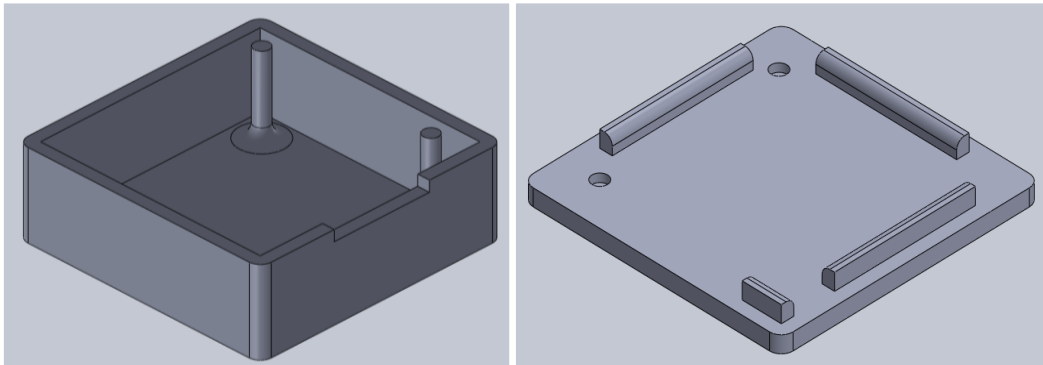


Fig. 7.6: Caja impresa en 3D y Módulo RTC

A.4. Scripts Raspberry estación de tierra

Script 1: programar todo (*schedule all*).

Es el que arranca todo el proceso, se puede ejecutar manualmente, aunque se ejecuta automáticamente cada día a las 00:00, ya que así se ha programado con *crontab* (un administrador de procesos periódicos).

```
1 0 * * * /home/pi/weather/predict/schedule_all.sh
```

Seguidamente se comprueba la conexión a internet haciendo un ping a *google.com*: si el ping es satisfactorio significa que sí hay y se descargará de la web *celestrak.com* un archivo *.TLE* con los datos de varios satélites meteorológicos, de los que se seleccionarán los de los satélites NOAA 15, 18 y 19; si el ping a *google.com* diese error, significa que no hay conexión a internet y usará el último TLE que se tuviese descargado.

```
if curl -s --head --request GET www.google.com | grep "200 OK" > /dev/null ; then
wget -qR https://www.celestrak.com/NORAD/elements/weather.txt -O /home/pi/weather/predict/weather.txt
grep "NOAA 15" /home/pi/weather/predict/weather.txt -A 2 > /home/pi/weather/predict/weather.tle
grep "NOAA 18" /home/pi/weather/predict/weather.txt -A 2 >> /home/pi/weather/predict/weather.tle
grep "NOAA 19" /home/pi/weather/predict/weather.txt -A 2 >> /home/pi/weather/predict/weather.tle

echo "Internet Connection OK"
else
echo "NO internet connection!"
fi
```

A continuación, se eliminarán posibles tareas previas programadas en la Raspberry, para evitar duplicados. Después se programarán las nuevas tareas (pasadas de satélite) del día ejecutando el *script* de predicción de pasadas (*schedule satellite*) indicándole a este el nombre de cada satélite (además de la frecuencia de emisión) que queremos predecir. Por último, se crea un archivo de texto (*.txt*) con las tareas ordenadas cronológicamente.

```
#Remove all AT jobs

for i in `atq | awk '{print $1}'`;do atrm $i;done

#Schedule Satellite Passes:

/home/pi/weather/predict/schedule_satellite.sh "NOAA 19" 137.1000
/home/pi/weather/predict/schedule_satellite.sh "NOAA 18" 137.9125
/home/pi/weather/predict/schedule_satellite.sh "NOAA 15" 137.6200

#crear txt que enumere las pasadas de ese día
atq | sort -k 6n -k 3M -k 4n -k 5 -k 7 -k 1 > /home/pi/weather/pasadas_`date +"%d-%m-%Y"` .txt
```

Script 2: programar pasadas de satélite (*schedule satellite*)

El segundo *script* se encargará de predecir los momentos del día de en aparecerán y desaparecerán los satélites NOAA 15 ,18 y 19 por nuestro

horizonte, lo que marcará el inicio y final de los procesos de decodificación. Estos se obtienen gracias al *software Predict* que toma como entrada información orbital del archivo .TLE. También se obtendrán otras variables de interés, entre las que se encuentra la elevación máxima.

```
PREDICTION_START="/usr/bin/predict -t /home/pi/weather/predict/weather.tle -p "$1" | head -1
PREDICTION_END="/usr/bin/predict -t /home/pi/weather/predict/weather.tle -p "$1" | tail -1'

var2=`echo $PREDICTION_END | cut -d " " -f 1`
MAXELEV="/usr/bin/predict -t /home/pi/weather/predict/weather.tle -p "$1" | awk -v max=0 '{if($5>max){max=$5}}END(print max)'"
while [ `date --date="TZ=\\"UTC\\" @${var2}" +%D` == `date +%D` ]; do
START_TIME=`echo $PREDICTION_START | cut -d " " -f 3-4`
var1=`echo $PREDICTION_START | cut -d " " -f 1`
var3=`echo $START_TIME | cut -d " " -f 2 | cut -d ":" -f 3`
TIMER=`expr $var2 - $var1 + $var3`
OUTDATE=`date --date="TZ=\\"UTC\\" $START_TIME" +%Y%m%d-%H%M%S`
```

De los momentos del día en que aparezcan los satélites por el horizonte sólo se tendrán en cuenta aquellos en que el satélite alcance una elevación máxima mayor a 19°, ya que para menores elevaciones la señal suele ser débil.

```
if [ $MAXELEV -gt 19 ]
then
echo $(1/" ")${OUTDATE} $MAXELEV
echo "/home/pi/weather/predict/receive_and_process_satellite.sh \"$(1)\ " $2 /home/pi/weather/${1/" "} ${OUTDATE} /home/pi/weather/predict/weather.tle $var1 $TIMER"
fi
nextpredict=`expr $var2 + 60`
PREDICTION_START="/usr/bin/predict -t /home/pi/weather/predict/weather.tle -p "$1" $nextpredict | head -1
PREDICTION_END="/usr/bin/predict -t /home/pi/weather/predict/weather.tle -p "$1" $nextpredict | tail -1'
MAXELEV="/usr/bin/predict -t /home/pi/weather/predict/weather.tle -p "$1" $nextpredict | awk -v max=0 '{if($5>max){max=$5}}END(print max)'"
var2=`echo $PREDICTION_END | cut -d " " -f 1`
done
```

Script 3: Procesar señal enviada por el satélite (*process satellite*)

El tercer y último *script* se ocupa de la recepción de la señal y decodificación de la imagen APT que tomaron los radiómetros del NOAA y se transmite a la Tierra.

Comienza creando una carpeta para alojar las imágenes de la pasada, que tiene como nombre: nombre del satélite, fecha y hora de la pasada.

```
NOW=$(date +%d-%m-%Y_%H-%M)
mkdir /home/pi/weather/${NOW}
```

Seguidamente usa un comando para que el RTL_SDR empiece a recibir y grabar lo que recibe, con las siguientes órdenes:

- **timeout \$6**: tiempo de grabación \$6.
- **rtl_fm -f \$2**: recepción fm en la frecuencia \$2.
- **-s 60k**: muestreo a 60k/sec.
- **-g 42.1**: ganancia a 42,1.
- **-p 0**: corrección ppm cristal oscilador RTL_SDR a cero.
- **-E deemp -F 9**: parámetros de filtrado de la señal.
- **.raw**: crea salida de audio sin procesar ni comprimir.

```
sudo timeout $6 rtl_fm -f ${2}M -s 60k -g 42.1 -p 0 -E deemp -F 9 raw.raw
```

A continuación se llama al *software* de procesamiento de audio SOX para que cree un .wav a a partir del .raw. Esto se hace debido a que WXtoImg no es capaz de abrir archivos .raw. Luego con el comando *touch*, al .wav se le dará como fecha de modificación la actual.

```
sox -t raw -r 60000 -b 16 -c 1 -L -e signed-integer raw.raw $3.wav rate 11025
touch -r raw.raw $3.wav
```

Cuando ya esté listo el archivo .wav con la grabación de la pasada se llamará a WXtoImg para que a partir de esta, genere las imágenes.

Primero crea una plantilla con las fronteras políticas de los países de color rojo. Seguidamente crea las imágenes con los filtros que se le requieran al *software*. A algunas se les superpondrá la plantilla con las fronteras físicas para ayudar a la interpretación y visualización. Existe un gran número de filtros que se pueden aplicar todos detallados en el manual del mismo *software* [10]. Si queremos la imagen original, sin aplicar filtros ni la plantilla de países, seleccionaremos la opción *pristine*.

```
PassStart=`expr $5 + 90`
if [ -e $3.wav ]
then
  /usr/local/bin/wxmap -T "${1}" -H $4 -p 0 -l 0 -o $PassStart $3)-map.png

  /usr/local/bin/wxtoimg -m $3)-map.png -c -e pris $3.wav $3).pris.png

  /usr/local/bin/wxtoimg -m $3)-map.png -e ZA $3.wav $3.ZA.png

  /usr/local/bin/wxtoimg -m $3)-map.png -c -e norm $3.wav $3).norm.png

  /usr/local/bin/wxtoimg -m $3)-map.png -c -e NO $3.wav $3).NO.png

  /usr/local/bin/wxtoimg -m $3)-map.png -c -e MCIR $3.wav $3).MCIR.png

  /usr/local/bin/wxtoimg -m $3)-map.png -c -e MSA $3.wav $3).color.png

  /usr/local/bin/wxtoimg -m $3)-map.png -c -e HVCT $3.wav $3).HVCT.png

  /usr/local/bin/wxtoimg -m $3)-map.png -c -e therm $3.wav $3).Thermal.png

  /usr/local/bin/wxtoimg -m $3)-map.png -c -e JF $3.wav $3).JF.png
fi
```

Finalmente se guardarán las imágenes y la grabación en la carpeta *weather*. las cuales se cortarán de esta carpeta para enviarlas a la que se creó al inicio de este *script* para mantener un mejor orden, la grabación es recomendable borrarla debido a su mayor tamaño (unos 20MB).

```
cp /home/pi/weather/*.png /home/pi/weather/${NOW}/
rm /home/pi/weather/${NOW}/*-map.png
rm /home/pi/weather/*.png
rm /home/pi/weather/*.wav
```

El proceso de grabar y decodificar la pasada ha terminado. La Raspberry queda esperando a la próxima pasada. Se pueden consultar las imágenes de esta o anteriores pasadas de forma remota o local con WinSCP.

A.5 Galería de Imágenes recibidas. DANA 1 de Septiembre de 2021.

Mediante las siguientes imágenes captadas por los tres satélites NOAA, y recibidas por la estación de tierra autónoma, se puede ver la evolución de dicho fenómeno meteorológico durante el día anterior y posterior. La antena utilizada es el dipolo un V situado en la repisa de una ventana.

Las imágenes corresponderán al CANAL A (Visible/IR) y CANAL B (IR) del modo APT en blanco y negro. Además aplicando el filtro *Thermal* a la imagen IR, se generará una tercera imagen con colores de la distribución de la temperatura, que permite también hacerse una mejor idea de la distribución las precipitaciones.

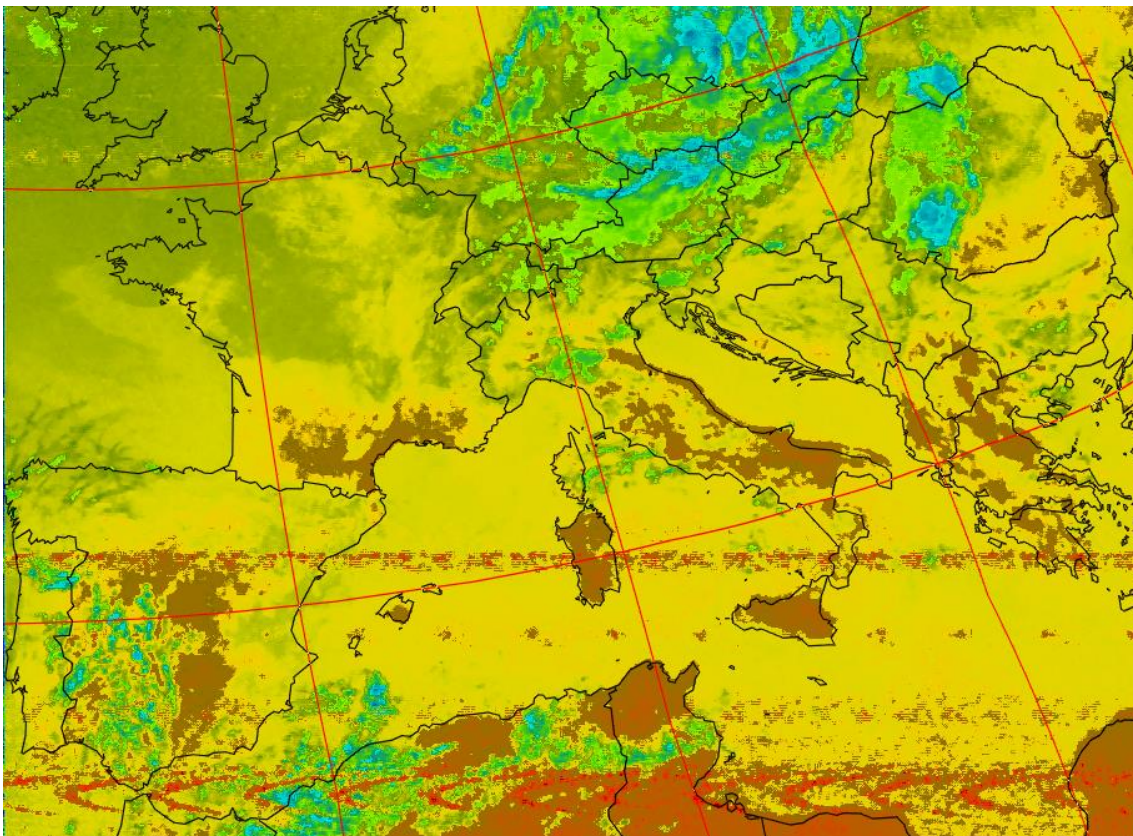
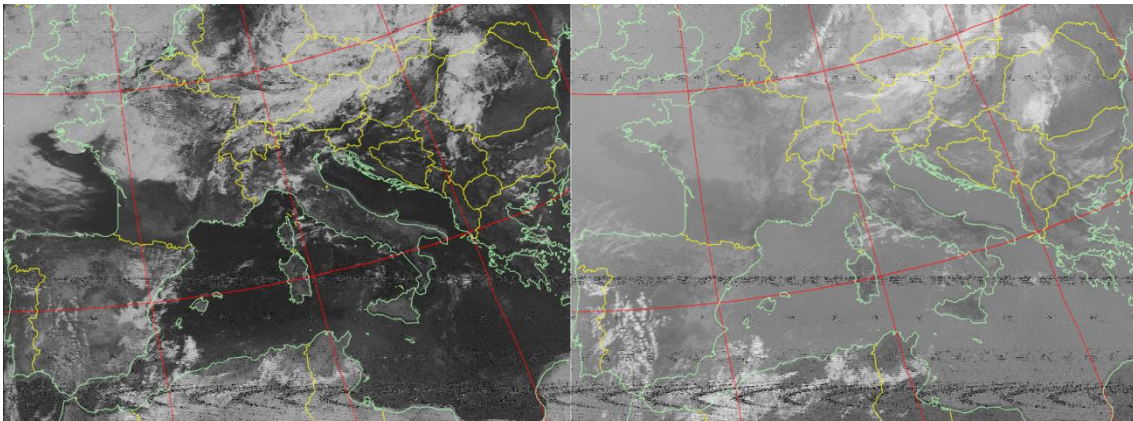


Fig. 7.7: 11:44h 31-8-2021. NOAA-18. Canal A (Vis) (izquierda) , Canal B (IR) (derecha), *Thermal* (abajo).

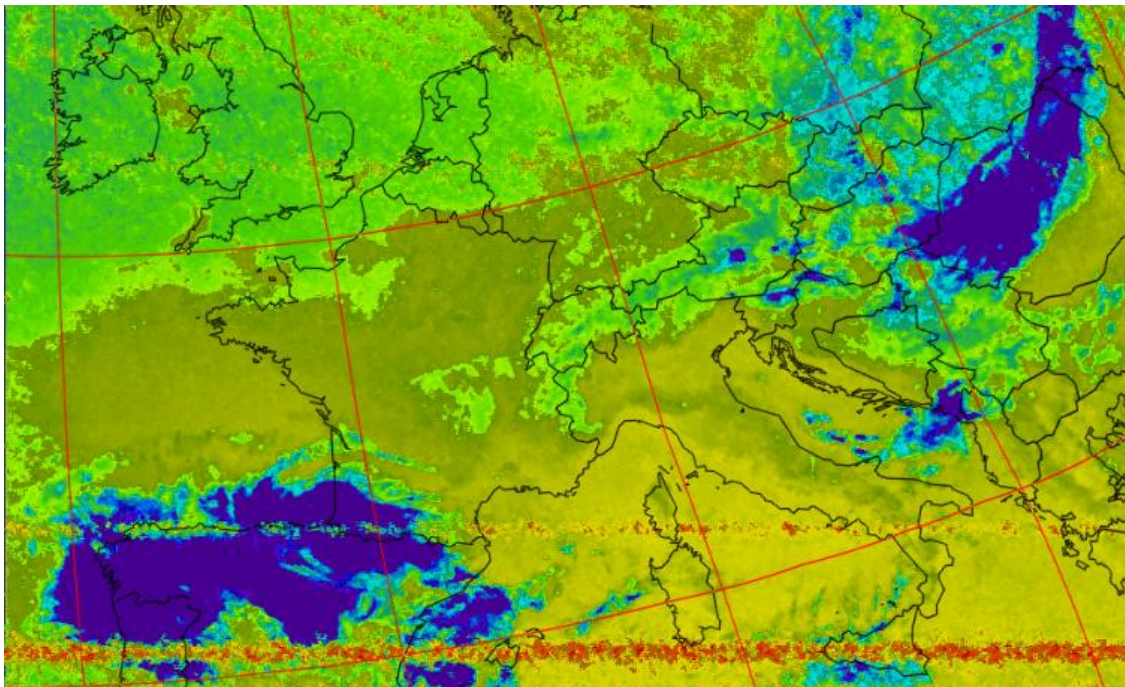
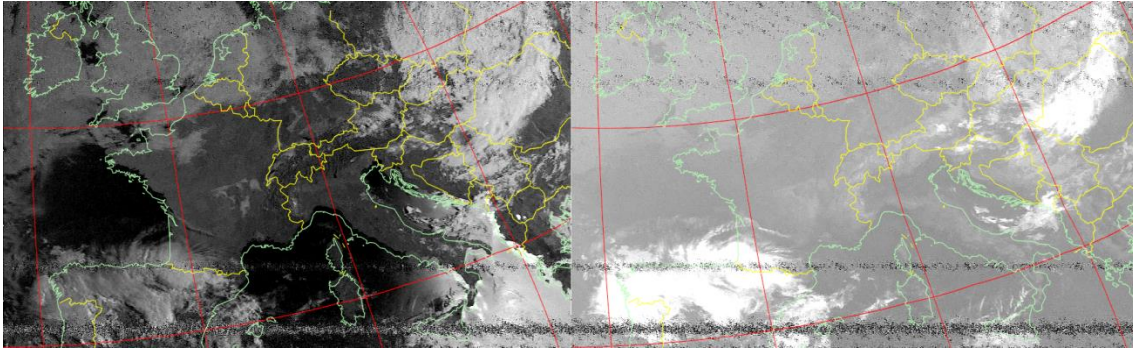


Fig. 7.8: 09:19h 1-9-2021. NOAA-15.

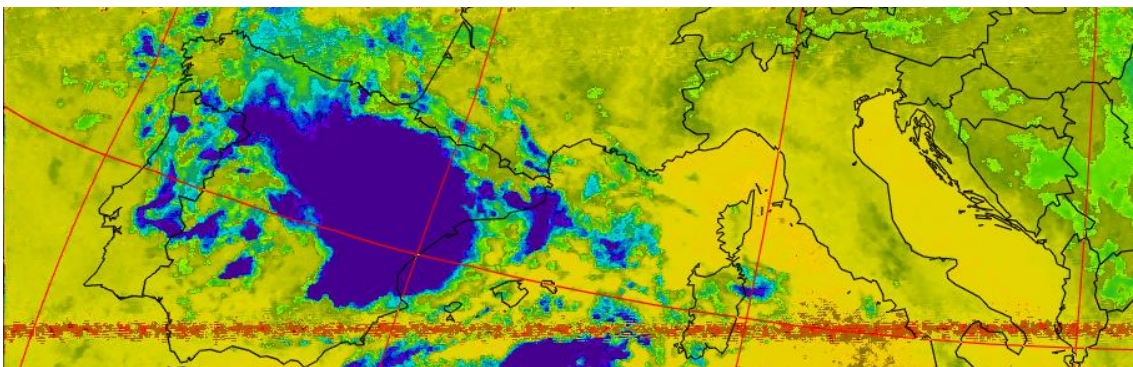
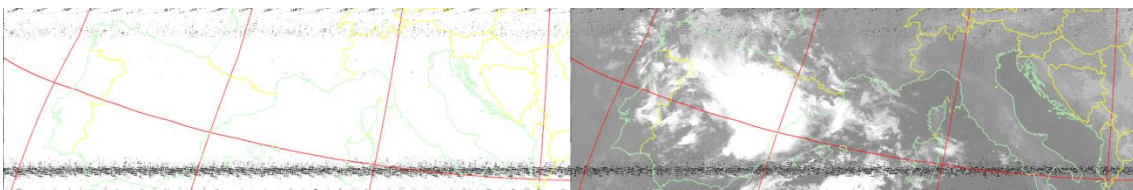


Fig. 7.9: 22:58h 1-9-2021. NOAA-19. El Canal A ha pasado a IR al ser de noche.

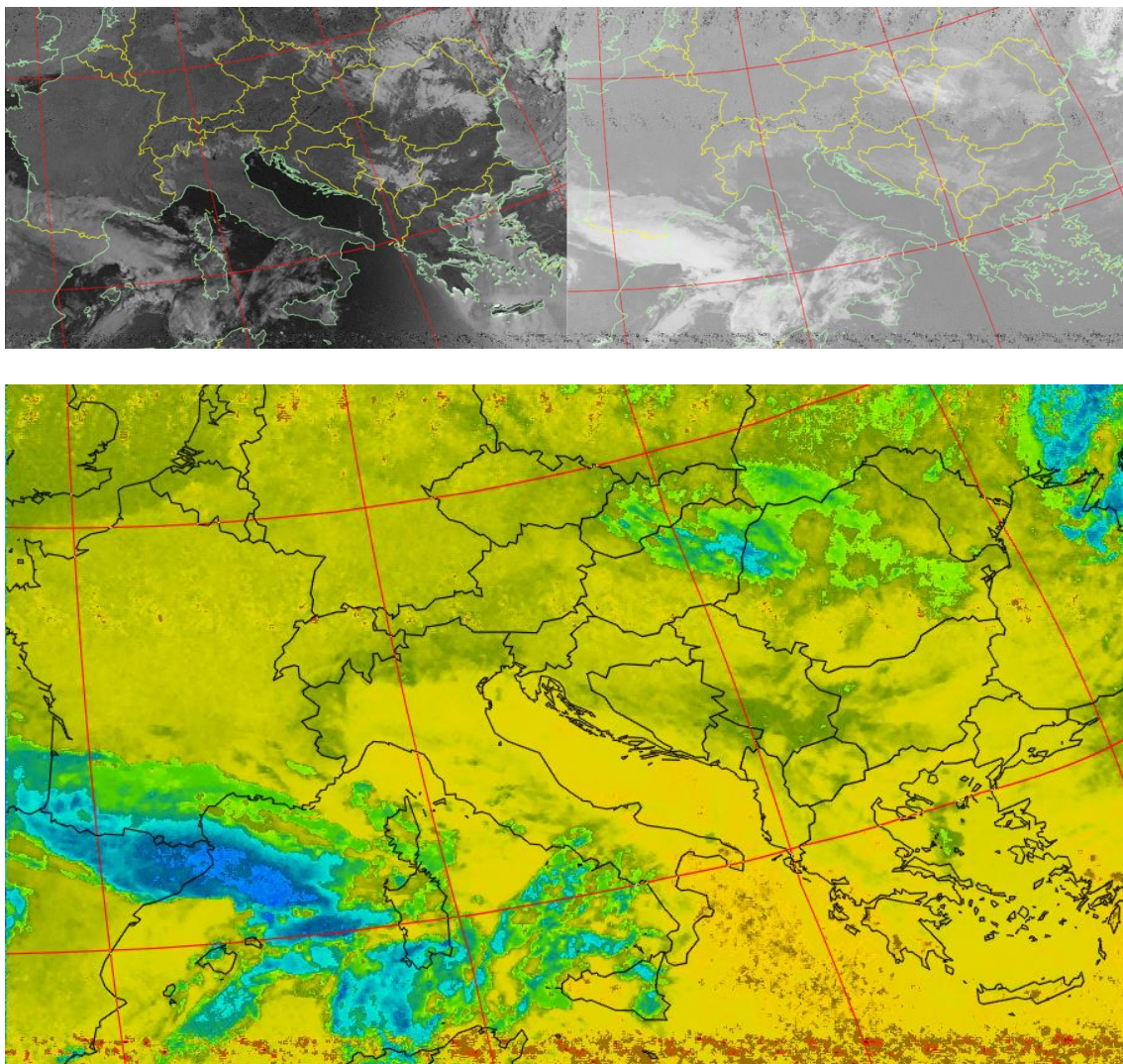


Fig. 7.10: 08:54h 2-9-2021. NOAA-15.

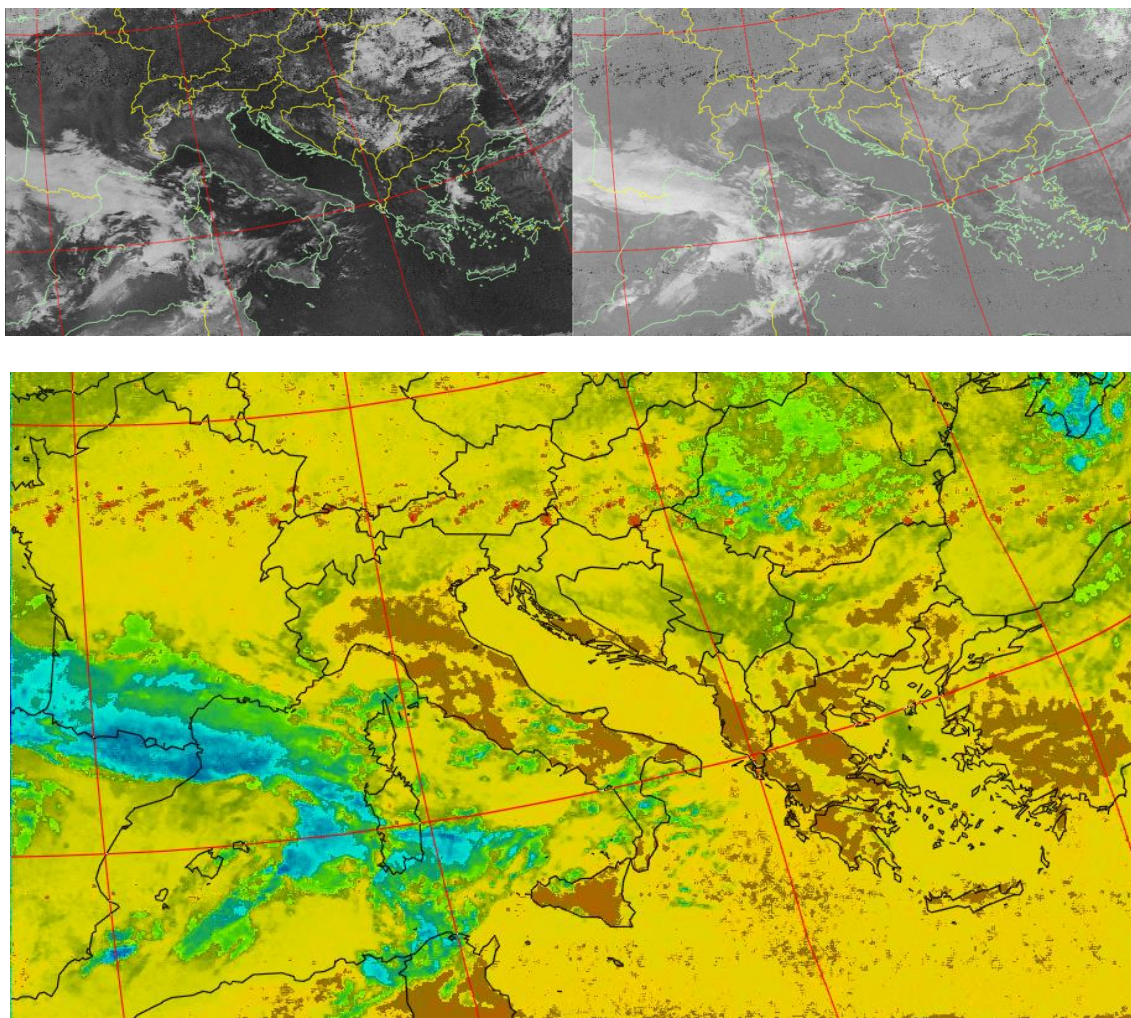


Fig. 7.11: 11:20h 2-9-2021. NOAA-18.

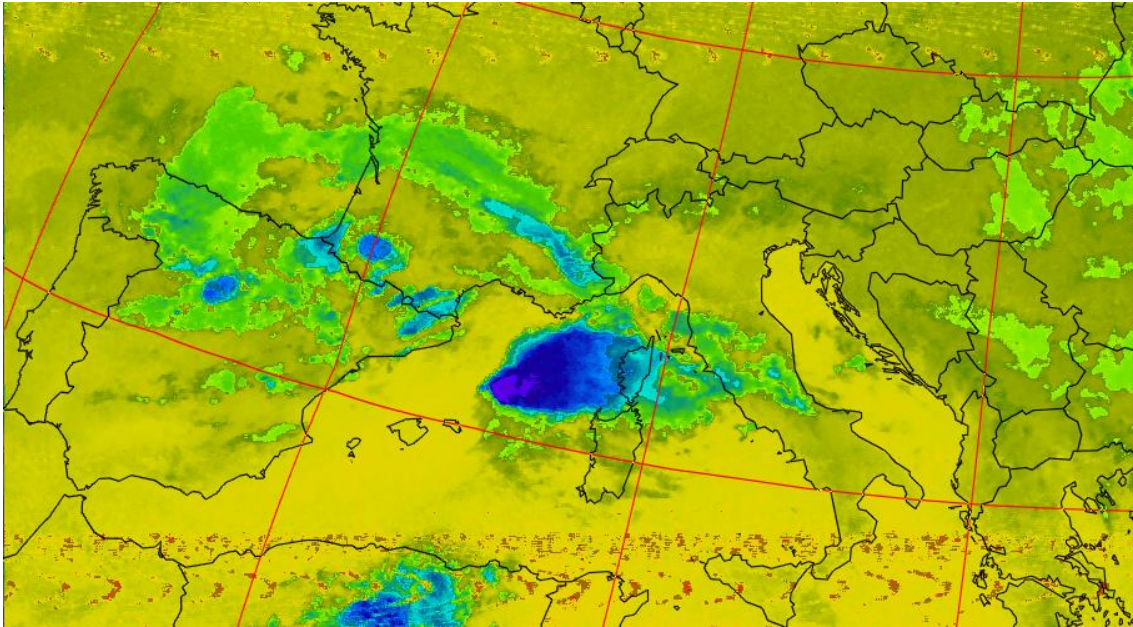
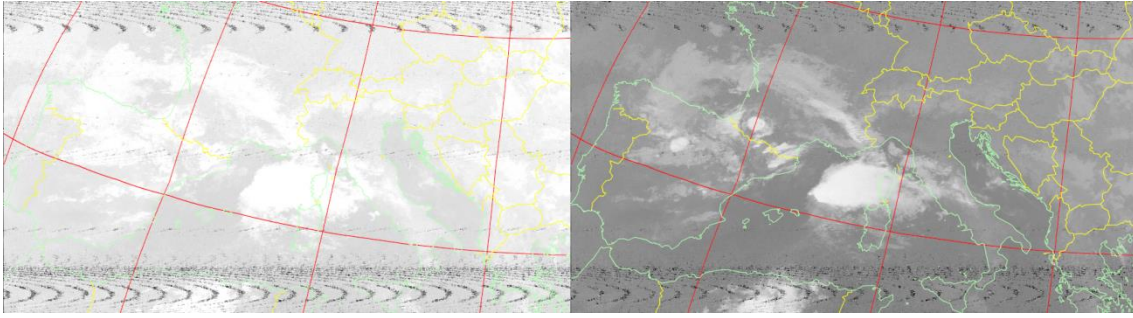


Fig. 7.12: 22:46h 2-9-2021.NOAA-18.