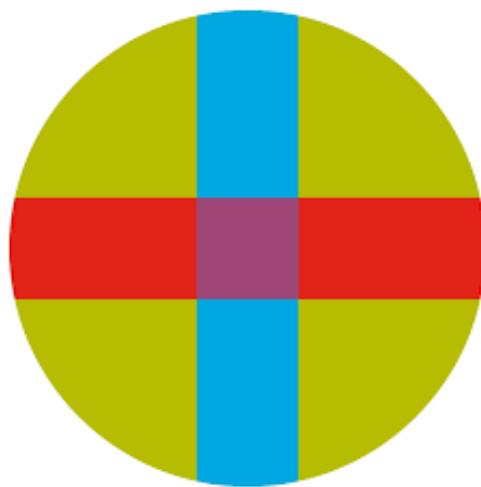


Universidad CEU - San Pablo

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

GRADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE  
TELECOMUNICACIONES



*Trabajo Fin de Grado*  
**Estudio, diseño y fabricación de  
antenas para la recepción de satélites  
meteorológicos**

Autor: Enrique Robles Uriel

Director: Antonio Alex Amor

Junio 2023

Datos del alumno:

Nombre: Enrique Robles Uriel

---

Datos del trabajo:

Título del proyecto: Estudio, diseño y fabricación de antenas para la recepción de satélites meteorológicos

---

Tribunal calificador:

Presidente:

Fdo.:

Secretario:

Fdo.:

Vocal:

Fdo.:

---

Reunido este tribunal el \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_, acuerda otorgar al Trabajo Fin de Grado presentado por Don \_\_\_\_\_ la calificación de \_\_\_\_\_ .



## Agradecimientos

Antonio, por guiarme en todo momento durante el trabajo final de grado y ayudarme a hacer un documento del que estoy muy orgulloso.

UGR (Universidad de Granada), por el uso de la licencia del CST Studio Software.

Raúl y Alfonso, porque la construcción de la antena fue en gran parte suya con todas las horas que me han dedicado en el laboratorio.

Eloy, por ayudarme a iniciar el tfg y buscarme un hueco en la universidad para construir mi antena, y Gianluca, por prestarme en analizador de redes para medir los parámetros de las antenas.

Dani, Carlos, María, Alba y Jaime Bermejo, porque sus pequeñas aportaciones a mi trabajo final de grado son el motivo que haya disfrutado tanto del proceso.

Jose Ramón Vargas, por dejarme su equipo de herramientas para construir la base de la antena.

Todos los profesores y compañeros de la carrera.

Toda mi familia, que es lo mejor que tengo en la vida y sin ellos no hubiera podido realizar este trabajo.



## **Abstract**

Este trabajo presenta el estudio, diseño y fabricación de antenas para la recepción de satélites meteorológicos. En primera instancia, se realiza un estudio teórico sobre satélites meteorológicos (órbitas, accesibilidad, etc.) y agencias espaciales que los operan, todo con el objetivo de seleccionar de manera óptima antenas que permitan recibir sus imágenes. Posteriormente, se hace uso del software electromagnético comercial CST Studio para el diseño de dos antenas. Dichas antenas son fabricadas y su correcta operación es verificada en el laboratorio.

La primera antena es el dipolo en V, un dipolo convencional al que se le rotan los brazos para conseguir un diagrama más omnidireccional. La segunda antena es la Turnstile, dos dipolos cruzados y desfasados 90º, con el que conseguimos una polarización circular. Usando un SDR para la recepción de la señal y software para la localización de los satélites, se consigue la decodificación de las imágenes transmitidas por los satélites NOAA. Finalmente, se interpreta la información recibida y se realiza una campaña de visibilidad de la Ingeniería de Telecomunicaciones.

## **Abstract**

This work presents the study, design, and manufacturing of antennas for the reception of weather satellites. Firstly, a theoretical study is conducted on weather satellites (orbits, accessibility, etc.) and the space agencies that operate them, all with the aim of optimally selecting antennas that allow for the reception of their images. Subsequently, the commercial electromagnetic software CST Studio is used for the design of two antennas. These antennas are manufactured, and their proper operation is verified in the laboratory.

The first antenna is the V-dipole, a conventional dipole antenna in which the arms are rotated to achieve a more omnidirectional radiation pattern. The second antenna is the Turnstile, consisting of two crossed and 90° phased dipole elements, which enables circular polarization. By using a software-defined radio (SDR) for signal reception and software for satellite tracking, the decoding of images transmitted by NOAA satellites is achieved. Finally, the received information is interpreted, and a visibility campaign for Telecommunication Engineering is carried out.

*El universo nos habla en señales electromagnéticas y las antenas nos permiten escucharlo.*

# Índice

<b>1. Introducción y objetivos</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	3
<b>2. Métodos</b>	<b>4</b>
2.1. CST Studio Software . . . . .	4
2.2. SDR . . . . .	5
2.3. Software de recepción para el satélite . . . . .	6
2.4. Materiales para la fabricación de la antena . . . . .	7
2.5. Herramientas del laboratorio . . . . .	8
2.6. Analizador de redes . . . . .	9
<b>3. Los satélites meteorológicos</b>	<b>10</b>
3.1. Órbitas de satélites meteorológicos . . . . .	10
3.1.1. Satélites de órbita polar . . . . .	10
3.1.2. Satélites de órbita geoestacionaria . . . . .	11
3.1.3. Comparativa entre la órbita polar y órbita geoestacionaria para el diseño de antenas receptoras . . . . .	12
3.2. Agencias espaciales con satélites meteorológicos . . . . .	12
3.2.1. NOAA . . . . .	12
3.2.2. EUMETSAT . . . . .	13
3.2.3. Otras agencias . . . . .	14
3.3. Satélites meteorológicos de interés . . . . .	15
3.3.1. GOES . . . . .	15
3.3.2. NOAA . . . . .	17
3.3.3. METEOSAT/METOP . . . . .	19
3.4. Decisión sobre el satélite a recibir . . . . .	19
<b>4. Estudio teórico y simulación de las antenas</b>	<b>21</b>
4.1. ¿Qué es una antena? . . . . .	21

4.2.	Características principales de una antena . . . . .	22
4.2.1.	Frecuencia de operación . . . . .	22
4.2.2.	Diagrama de radiación . . . . .	23
4.2.3.	Directividad . . . . .	23
4.2.4.	Polarización . . . . .	24
4.2.5.	Relación axial . . . . .	24
4.2.6.	Impedancia y parámetro S11 . . . . .	25
4.3.	Parámetros del NOAA-19 . . . . .	26
4.4.	Antenas para la recepción de satélites NOAA . . . . .	26
4.5.	Antena Cuadrifilar Helicoidal . . . . .	27
4.6.	Turnstile Antenna . . . . .	27
4.7.	V dipole . . . . .	28
4.8.	Double Cross Antenna . . . . .	29
4.9.	Antenas utilizadas en el trabajo . . . . .	29
<b>5.</b>	<b>Diseño de antenas para la recepción meteorológica</b>	<b>30</b>
5.1.	Diseño del Dipolo en V . . . . .	30
5.1.1.	Simulación del dipolo en V, con apertura de 120º a 137.5 MHz . . .	35
5.1.2.	Adición de un balun . . . . .	35
5.2.	Diseño de la antena Turnstile . . . . .	38
5.2.1.	Distribución de corrientes en la antena . . . . .	41
<b>6.</b>	<b>Fabricación y medición de las antenas</b>	<b>43</b>
6.1.	Fabricación de la base de la antena . . . . .	43
6.2.	Fabricación del dipolo en V . . . . .	44
6.3.	Fabricación de la antena Turnstile . . . . .	46
6.4.	Imágenes de las antenas construidas . . . . .	48
6.5.	Medición de las antenas . . . . .	49
<b>7.</b>	<b>Recepción de la señal satélite y análisis de resultados</b>	<b>51</b>
7.1.	Esquema de la recepción satélite tras el diseño . . . . .	51
7.2.	Ejemplo de recepción de la señal satélite . . . . .	52

7.3.	Análisis de resultados . . . . .	53
7.3.1.	MCIR con precipitaciones . . . . .	54
7.3.2.	MSA con precipitaciones . . . . .	54
7.3.3.	HVCT con precipitaciones . . . . .	55
7.3.4.	Temperatura de la superficie del mar . . . . .	56
7.3.5.	Térmica . . . . .	56
<b>8.</b>	<b>Conclusión y líneas futuras</b>	<b>57</b>
8.1.	Conclusiones . . . . .	57
8.2.	Líneas futuras . . . . .	58
8.3.	Visibilidad de Ingeniería de Telecomunicaciones . . . . .	59
8.3.1.	Video del trabajo final de grado . . . . .	59
8.3.2.	Visibilidad en la universidad . . . . .	59
8.3.3.	Visibilidad en redes sociales . . . . .	60

# Índice de figuras

1.	Esquema de recepción del satélite . . . . .	2
2.	Ejemplo de un diseño electromagnético en CST . . . . .	4
3.	Dispositivo SDR . . . . .	5
4.	Esquema de un SDR . . . . .	5
5.	Imágenes representativas de los softwares empleados en el trabajo . . . . .	6
6.	Tubo PVC . . . . .	7
7.	Varilla de aluminio . . . . .	7
8.	Tabla de madera de pino . . . . .	7
9.	Soldador . . . . .	8
10.	Decapador . . . . .	8
11.	Sierra . . . . .	8
12.	Analizador vectorial de redes de transmisión utilizado en el trabajo . . . . .	9
13.	Imagen de una órbita polar [1] . . . . .	11
14.	Imagen de una órbita geosíncrona [2] . . . . .	11
15.	Logo de la NOAA . . . . .	13
16.	Logo EUMETSAT . . . . .	14
17.	Imagen extraída de <a href="https://www.goes-r.gov/mission/history.html">https://www.goes-r.gov/mission/history.html</a> . . . . .	16
18.	Imagen full disk de la Tierra [3] . . . . .	16
19.	Imagen HRPT del NOAA-19 [4] . . . . .	18
20.	Elemento metálico radiando . . . . .	21
21.	Zona de campo lejano o de Fraunhofer [5] . . . . .	21
22.	Distribución de corriente en un cable [5] . . . . .	22
23.	Distribución de corriente en un cable doblado [5] . . . . .	22
24.	Diagrama de radiación de una antena en sus cortes 2D horizontal y vertical. . . . .	23
25.	Diagrama de radiación de una antena según su directividad [6] . . . . .	23
26.	Tipos de polarización [7] . . . . .	24
27.	Relación axial de una antena . . . . .	24
28.	Adaptación de impedancia a una antena . . . . .	25
29.	Red de dos puertos . . . . .	25

30.	Antena Cuadrifilar Helicoidal . . . . .	27
31.	Antena Turnstile . . . . .	28
32.	Antena Dipolo en V . . . . .	28
33.	Double Cross Antenna . . . . .	29
34.	Modelado del dipolo en V . . . . .	30
35.	Dipolo en V operando en modo directivo . . . . .	31
36.	Diagramas de radiación del dipolo en V directivo . . . . .	31
37.	Modelado del dipolo en V bidireccional . . . . .	32
38.	Diagramas de radiación con $\phi = 0$ según la rotación del dipolo en V . . . . .	33
39.	Diagramas de radiación en $\theta = 0$ según la rotación del dipolo en V . . . . .	33
40.	Comparación de diagramas de radiación entre el dipolo estándar y el dipolo en V . . . . .	34
41.	Simulación del dipolo en V $120^\circ$ a 137.5 MHz . . . . .	35
42.	Balun $\lambda/4$ 1:1 . . . . .	36
43.	Simulación del dipolo en V con balun . . . . .	37
44.	Parámetros del dipolo en V con balun . . . . .	37
45.	Diagrama Turnstile en modo normal . . . . .	38
46.	Diagrama Turnstile en modo axial . . . . .	39
47.	Relación axial de la antena Turnstile 1D . . . . .	39
48.	Relación axial de la antena Turnstile 3D . . . . .	40
49.	Diagrama de radiación antena Turnstile con un plano de tierra a $\lambda/2$ . . . . .	41
50.	Parámetro $S_{11}$ de la antena Turnstile con plano de tierra a $\lambda/2$ . . . . .	41
51.	Corriente superficial de la antena Turnstile con fase = 0 . . . . .	42
52.	Corriente superficial de la antena Turnstile con fase = 90 . . . . .	42
53.	Base de la antena . . . . .	43
54.	Doblando la varilla con el decapador . . . . .	44
55.	Cortando varillas con la sierra . . . . .	45
56.	Dipolo en V construido . . . . .	45
57.	Conexiones de la antena Turnstile . . . . .	46
58.	Foto de la construcción de la antena Turnstile . . . . .	47
59.	Foto final de la antena dipolo en V construida . . . . .	48

60.	Foto final de la antena Turnstile construida . . . . .	48
61.	Mediciones del dipolo en V con el analizador de redes . . . . .	49
62.	Mediciones de la antena Turnstile con el analizador de redes . . . . .	50
63.	Esquema de recepción . . . . .	51
64.	Software para la localización de los satélites . . . . .	52
65.	Configuración del software SDR# . . . . .	53
66.	Imágenes transmitidas por el satélite NOAA . . . . .	54
67.	Imagen MCIR con precipitaciones . . . . .	54
68.	Imagen MSA con precipitaciones . . . . .	55
69.	Imagen HVCT con precipitaciones . . . . .	55
70.	Imagen de la temperatura de la superficie del mar . . . . .	56
71.	Imagen de la temperatura de la superficie terrestre . . . . .	56
72.	Vídeo de youtube . . . . .	59
73.	Publicación de LinkedIn . . . . .	60

# Índice de tablas

1.	Tabla comparación de órbitas . . . . .	12
2.	Tabla de frecuencias del GOES 17 [8] . . . . .	17
3.	Tabla de frecuencias NOAA-19 [8] . . . . .	18
4.	Tabla de comparación de los satélites . . . . .	19
5.	Tabla de parámetros útiles del NOAA-19 . . . . .	26
6.	Precio de los materiales del dipolo en V . . . . .	44
7.	Precio de los materiales de la antena Turnstile . . . . .	46



# 1. Introducción y objetivos

## 1.1. Contexto

Los satélites han sido una de las mayores revoluciones tecnológicas que el ser humano haya podido presenciar. Ofrecen comunicaciones globales de banda ancha para que cualquier persona pueda comunicarse con otra desde cualquier parte del mundo. Ofrecen navegación por satélite para poder geolocalizar cualquier persona o sistema. Ofrecen nuevas respuestas de investigación científica y espacial como pueden ser los telescopios Hubble y el reciente James Webb, y permiten un estudio de la Tierra mediante su observación para poder pronosticar acontecimientos meteorológicos. Estas son algunas de las cosas en las que los satélites han cambiado nuestra forma de vida.

Todo esto no sería posible sin el gran conocimiento que los ingenieros de telecomunicaciones han ido aportando durante nuestra "breve" historia. Pero tampoco sería posible sin el estudio, diseño y construcción de antenas que permitan la comunicación entre tierra y espacio. Es por eso que en este trabajo final de grado se quiere tratar un tema tan importante como es el de la recepción satelital desde tierra, orientándolo a uno de los servicios que nos ofrecen los satélites, la observación de nuestro propio planeta.

El trabajo final de grado consistirá en el estudio, diseño y fabricación de antenas para la recepción de satélites, en concreto satélites meteorológicos, que nos permitirán recibir imágenes de nuestro pequeño sitio en el universo.



**Figura 1:** Esquema de recepción del satélite

La Figura 1 ilustra todos los subsistemas que forman parte del esquema de recepción satelital. Como se puede observar en la parte izquierda superior de la figura, se encuentra el satélite meteorológico del que vamos a recibir. El satélite meteorológico emitirá las señales que serán recibidas por la antena. En la parte inferior derecha se muestran el dispositivo de recepción, que procesará la señal recogida por la antena, y el ordenador, que permitirá controlar el dispositivo y nos presentará los resultados.

## 1.2. Objetivos

En esta subsección se recogen todos los objetivos que se plantean lograr durante el desarrollo del trabajo.

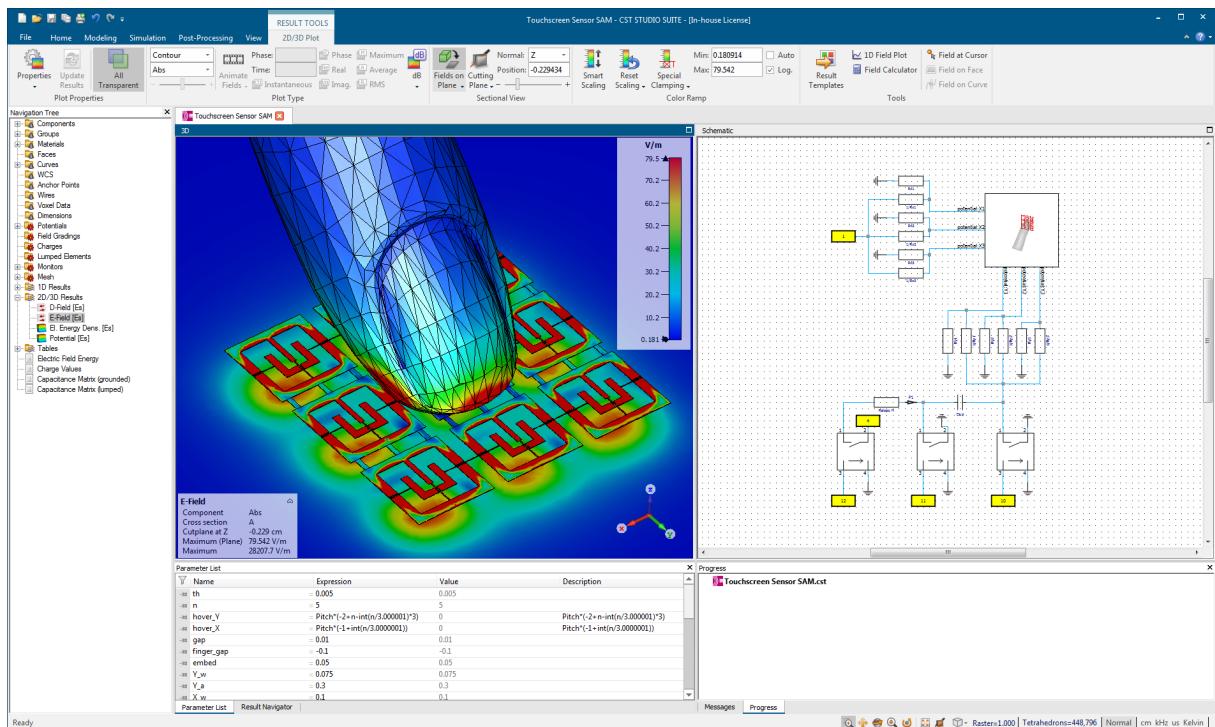
- Estudio teórico de las antenas para recepción de satélites meteorológicos. Se pretende conseguir un conocimiento teórico profundo sobre las distintas antenas que se presenten.
- Diseño software de las antenas para la recepción de satélites meteorológicos. Se pretende modelar las antenas escogidas en 3D y realizar simulaciones electromagnéticas para sacar conclusiones de diseño.
- Fabricación de antenas para la recepción de satélites meteorológicos. Se pretende mostrar cómo es todo el proceso de construir las antenas para que pueda ser fácilmente replicable.
- Proceso de recepción de la señal satélite. Se pretende entender todo el proceso que sufre la señal en la recepción.
- Comprensión del software necesario. Se pretende comprender todo el software que se utiliza para la recepción y procesamiento de la señal.
- Interpretación de las imágenes satélite recibidas. Se pretende sacar conclusiones de las imágenes que recibimos del satélite para demostrar el potente uso que se le puede dar a estos sistemas.
- Visibilidad de la ingeniería de telecomunicaciones y su importancia en la sociedad: Se pretende dar voz a la ingeniería de telecomunicaciones para que la sociedad tenga presente su importancia.

## 2. Métodos

En esta sección se encuentran recogidas todas las herramientas que han sido parte del trabajo final de grado.

### 2.1. CST Studio Software

CST Studio es un software electromagnético de uso comercial que cuenta con una amplia gama de métodos de simulación (tiempo, frecuencia, etc.) y herramientas de optimización. CST se utiliza en empresas líderes de tecnología e ingeniería en todo el mundo. Entre los objetos más comunes de simulación se encuentra el rendimiento de antenas, cálculo de sus parámetros electromagnéticos y su representación en gráficas y en 3D. Por todas estas razones, ha sido el software que hemos elegido para poder realizar el estudio [9].



**Figura 2:** Ejemplo de un diseño electromagnético en CST

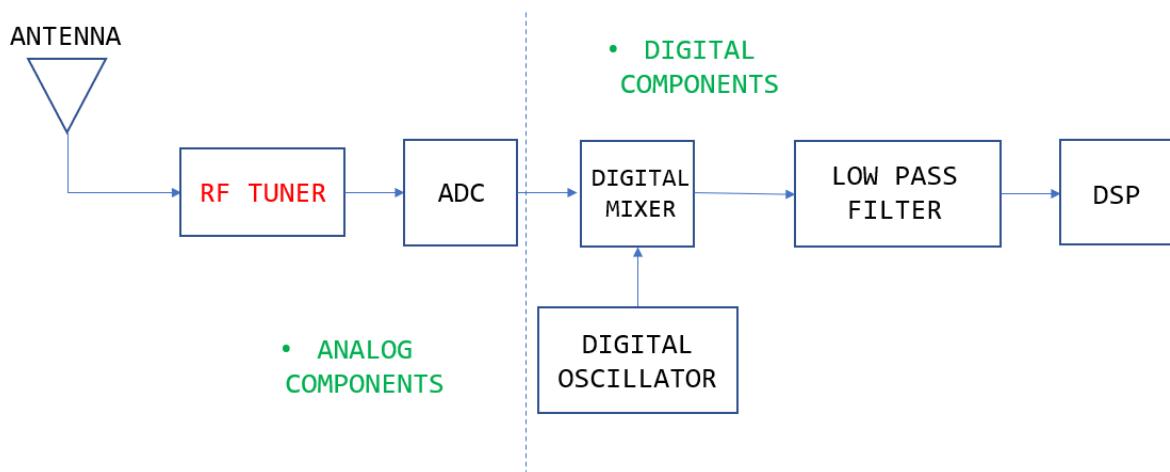
## 2.2. SDR

Para la recepción de la señal satelital se utiliza un Software Defined Radio [10].



**Figura 3:** Dispositivo SDR

SDR (Software-Defined Radio, por sus siglas en inglés) se refiere a un sistema de comunicaciones que utiliza software para realizar tareas de procesamiento y modulación de señales en lugar de hardware dedicado. En lugar de depender de componentes electrónicos específicos para cada función de radio, el SDR emplea una combinación de hardware básico y software configurable. Uno de estos dispositivos nos permite una gran flexibilidad para escuchar el espectro electromagnético y filtrar las señales que queramos mediante órdenes software.



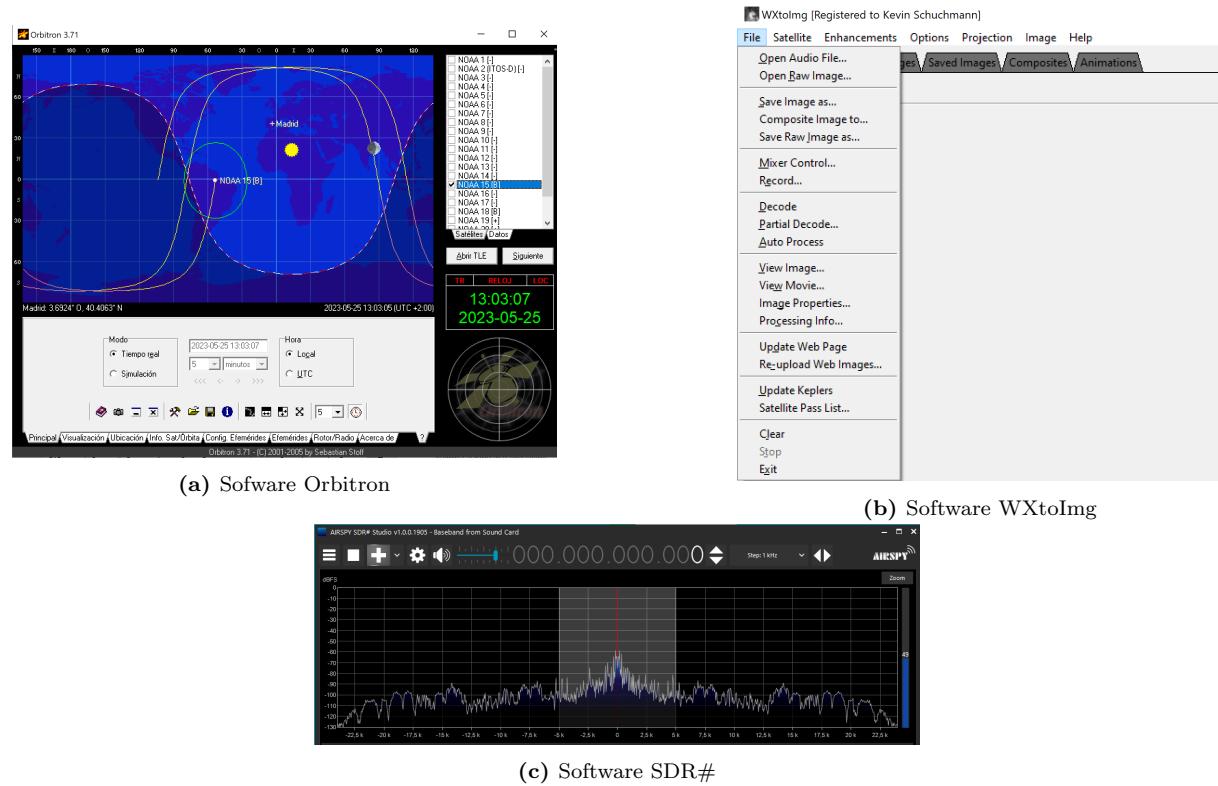
**Figura 4:** Esquema de un SDR

La señal es recibida por la antena y filtrada con un sintonizador que selecciona la frecuencia deseada. Esta señal analógica se digitaliza y pasa por un mezclador digital que usa un oscilador digital, donde se procesa y trata la señal como una señal de audio. Por último se pasa por un filtro paso bajo y se le aplica un muestreo en banda base con el DSP (Digital Signal Processor).

### 2.3. Software de recepción para el satélite

En el trabajo final de grado se han utilizado diferentes softwares para conseguir la recepción del satélite.

- SDR# [11]: Es un software que nos permite la lectura de las señales captadas por el SDR que conectemos a nuestro ordenador. En esencia, es un controlador de SDRs, que nos permite configurar un SDR a nuestro gusto mediante una interfaz software.
- WXtoImg [12]: Recoge el sonido que le pasamos como input y es capaz de generar una imagen de un satélite meteorológico. Además contiene una lista con el paso diario de todos los satélites de interés.
- Orbitron [13]: Es un software para la localización de satélites, lo que nos permite saber la posición de nuestro objetivo en tiempo real.



**Figura 5:** Imágenes representativas de los softwares empleados en el trabajo

## 2.4. Materiales para la fabricación de la antena

Para fabricar físicamente nuestra antena, debemos elegir los materiales con los que construirla. La siguiente lista refleja todos los materiales usados:

- Tubos PVC: Son muy accesibles y baratos. Además son ligeros, aislan eléctricamente, anticorrosivos y fáciles de manipular.



**Figura 6:** Tubo PVC

- Varillas de aluminio: Son ligeras, baratas, anticorrosivas, maleables y tienen una buena conductividad.



**Figura 7:** Varilla de aluminio

- Tabla de madera de pino: Es duradera, se puedeerrar fácilmente y puede aguantar peso.



**Figura 8:** Tabla de madera de pino

Además también se ha hecho uso de algodón, cable coaxial, cinta americana y pegamento.

## 2.5. Herramientas del laboratorio

Para la construcción de la antena fueron necesarias las siguientes herramientas:

- Soldador: Nos permite soldar las conexiones entre los cables y las varillas de aluminio.



**Figura 9:** Soldador

- Decapador: Es una pistola de aire caliente que se usa para quitar o eliminar pintura, barniz, adhesivos y otros revestimientos de superficies, y en nuestro caso para doblar metales.



**Figura 10:** Decapador

- Sierra: Se usan distintos tipos de sierra para cortar el PVC y el tablón de madera.



**Figura 11:** Sierra

- Alicates, pinzas y el sargento para la sujeción de piezas.

## 2.6. Analizador de redes

Generalmente conocido como VNA (Vector Network Analyzer), un analizador vectorial de antenas es un dispositivo que es capaz de caracterizar y analizar el comportamiento de las redes de transmisión y dispositivos electrónicos en términos de sus propiedades de respuesta de amplitud y fase. El funcionamiento básico de un VNA se basa en el principio de la técnica de barrido. Consiste en enviar señales de prueba a través del dispositivo o red que se está analizando y medir la respuesta de la señal transmitida y reflejada. Esta medición se realiza a múltiples frecuencias a lo largo de un rango determinado, lo que permite obtener un perfil detallado de la respuesta de la red en función de la frecuencia. De esta manera, podemos concluir qué es lo que está sucediendo en nuestra frecuencia de interés en nuestra antena. El VNA se ha utilizado es el Keysight M9370A en el M9018B PXIe Chassis [14].



**Figura 12:** Analizador vectorial de redes de transmisión utilizado en el trabajo

### 3. Los satélites meteorológicos

Los satélites meteorológicos son satélites artificiales que orbitan alrededor de la Tierra y que tienen como finalidad ofrecer datos e imágenes relacionados con las condiciones climáticas y meteorológicas. Realizan tareas tan importantes como la observación global, el pronóstico del tiempo, monitorización del clima o la gestión de desastres naturales y seguimiento de los fenómenos meteorológicos [15].

Para cumplir con los objetivos del trabajo final de grado es necesario entender cómo orbitan la Tierra estos satélites y qué satélites ofrecen este tipo de servicios. Esto nos permitirá escoger las antenas que se pretenden fabricar. En esta sección se van a estudiar las órbitas de los satélites meteorológicos, las distintas agencias espaciales que los operan y algunos de los satélites más significativos.

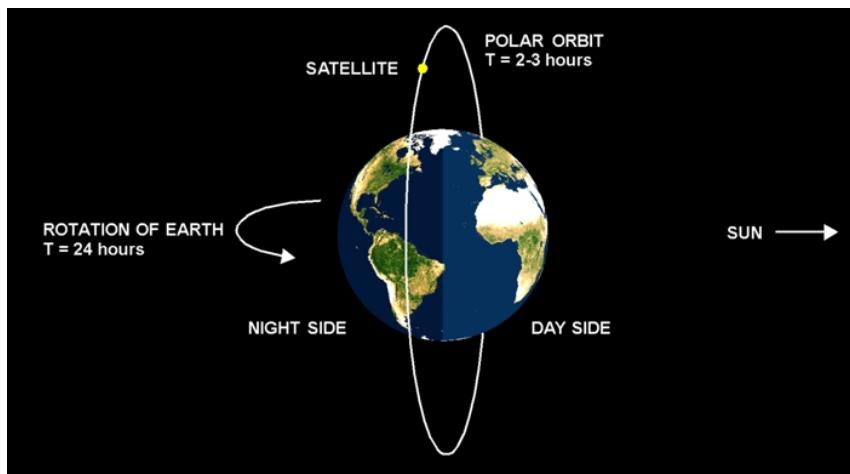
#### 3.1. Órbitas de satélites meteorológicos

Los satélites meteorológicos se encuentran en dos órbitas principalmente, y estas órbitas son necesarias estudiarlas para comprender cómo afectan al diseño de nuestras antenas.

##### 3.1.1. Satélites de órbita polar

Los satélites de órbita polar son satélites que orbitan por encima o casi por encima de los polos. Estos satélites se encuentran a una altura media de 700-800 km, y se suelen utilizar para la observación de la Tierra o proyectos militares.

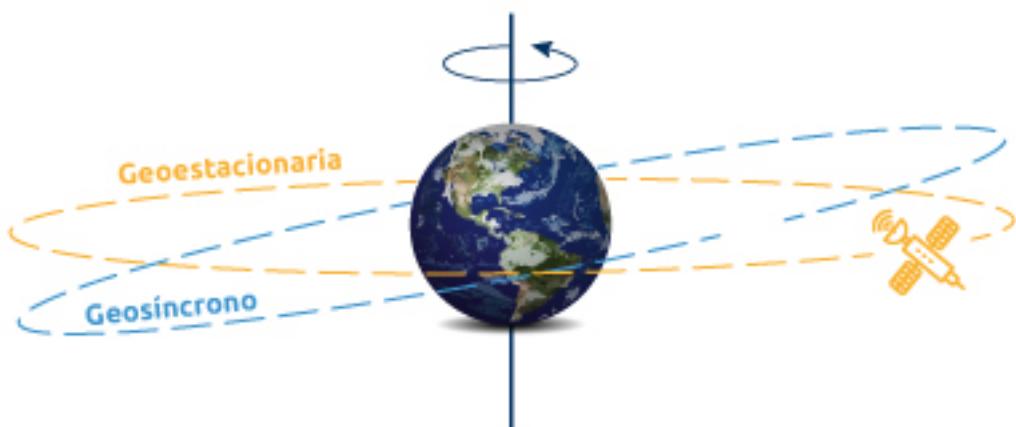
Las órbitas son *sun synchronous*, es decir, estos satélites tienen una órbita heliosíncrona, lo que significa que el satélite siempre va a cruzar aproximadamente el ecuador a una hora local, siendo esto muy útil para realizar mediciones y simplificar la dificultad de la recepción de los satélites.



**Figura 13:** Imagen de una órbita polar [1]

### 3.1.2. Satélites de órbita geoestacionaria

Probablemente sea la órbita más conocida. Estos satélites están en sincronía con la rotación de la Tierra encima de la línea del ecuador, es decir, siempre están encima del mismo punto de la Tierra, lo que nos es muy útil, ya que localizar estos satélites es muy sencillo, pues siempre están en el mismo lugar del cielo. De esta manera, con dirigir las antenas a esa dirección tenemos resuelto el localizar el satélite para siempre. Sin embargo, son satélites que se encuentran a 36000 km sobre el nivel del mar en la Tierra, por lo que se necesitan antenas directivas que lleguen a esa distancia y equipos de transmisión con más potencia. Además al ser geoestacionarios solo podrán verse desde aproximadamente un tercio de la superficie de la Tierra e introducen latencias de 500 a 600ms solo en retardo de propagación.



**Figura 14:** Imagen de una órbita geosíncrona [2]

### 3.1.3. Comparativa entre la órbita polar y órbita geoestacionaria para el diseño de antenas receptoras

Por lo tanto, para escoger un satélite meteorológico para recibir es necesario realizar una comparación entre las órbitas. Con la órbita polar tenemos la ventaja de que cubren con sus pasadas todo el planeta y están más cerca, lo que provoca que no tengamos que usar una antena muy directiva. Sin embargo, tenemos que hacer un seguimiento del satélite y sólo podemos recibir de ellos a determinadas horas del día. La órbita geoestacionaria nos ofrece un satélite que se encuentra siempre en la misma posición respecto a nosotros, pero está situado muy lejos, lo que provoca que tengamos que usar antenas mucho más directivas.

	ÓRBITA POLAR	ÓRBITA GEOSTACIONARIA
VENTAJAS	Antenas menos directivas. Orbitan la mayor parte del planeta.	Siempre en la misma posición, no hace falta seguimiento.
DESVENTAJAS	Hay que hacer un seguimiento del satélite para recibir la señal.	Antena más directiva. Solo se puede recibir en la cara del planeta donde se encuentre el satélite.

**Tabla 1:** Tabla comparación de órbitas

## 3.2. Agencias espaciales con satélites meteorológicos

En esta subsección, se va a hablar acerca de las agencias espaciales que se han tenido en cuenta a la hora de elegir nuestro satélite [8].

### 3.2.1. NOAA

La NOAA es la National Oceanic and Atmospheric Administration. Es la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional, perteneciente a los Estados Unidos. La misión de esta agencia es la de entender y predecir cambios en el clima, el tiempo, el océano y las costas y compartir ese conocimiento con el resto del mundo [4].

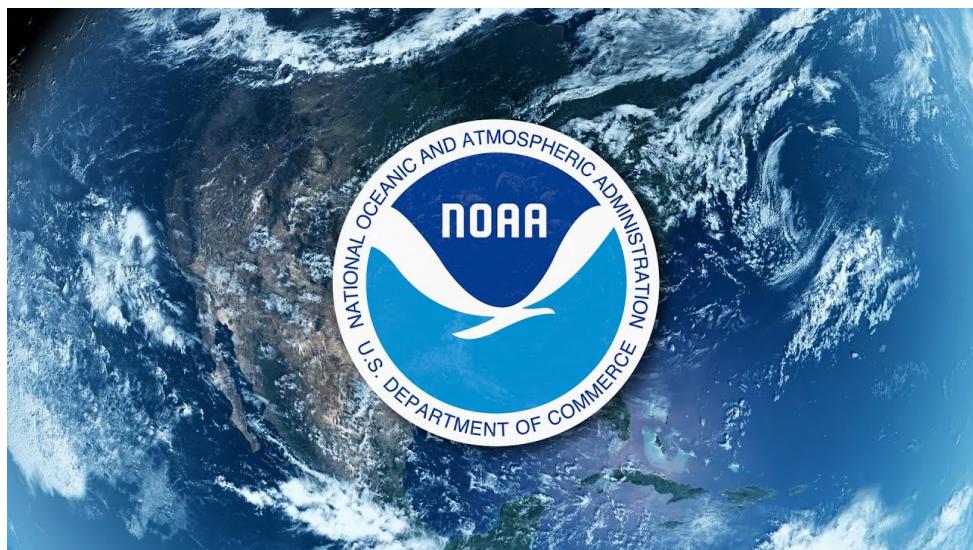
Es una administración que cuenta con 16 satélites activos actualmente (23/09/2022):

**Satélites en propiedad:**

- Cinco satélites geoestacionarios (GOES-14, -15, -16, -17 y -18)
- Cuatro satélites en órbita polar (NOAA-15, -18, -19 y -20)
- Un satélite en el espacio profundo (DSCOVR)

Satélites en los que **participa** la administración:

- SUOMI-PP (NASA lo tiene en propiedad)
- Jason-3 (CNES lo tiene en propiedad)
- Tres programas de satélites de defensa meteorológica (F-16, F-17, F-19)
- EWS-G1 (Air Force lo tiene en propiedad, antes era el GOES-13)



**Figura 15:** Logo de la NOAA

### 3.2.2. EUMETSAT

Eumetsat es una organización intergubernamental establecida en Darmstadt, Alemania. Sus siglas significan European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites. Esta organización se encarga de operar los satélites meteorológicos geoestacionarios que se encuentran sobre Europa, África y el Océano Índico [16].

Además también se encargan de satélites de órbita polar en colaboración con la NOAA. También es partícipe de las misiones Jason que involucran Europa y Estados Unidos.

Los datos y productos de los satélites de EUMETSAT son vitales para el pronóstico del tiempo y son de gran significado para la contribución de la monitorización del entorno y el cambio climático.

El listado de los satélites que operan sería el siguiente:

- Actualmente operan el Meteosat-9, -10 and -11 en una órbita geoestacionaria (36000 km) sobre Europa, África y el océano Índico.
- En órbita polar podemos encontrar la serie Metop. Estos satélites son parte de la contribución Europea a los satélites polares de la NOAA. Los actualmente activos son el Metop-B y el Metop-C. Además hay un proyecto futuro para poner en órbita nuevas generaciones de estos satélites.



**Figura 16:** Logo EUMETSAT

### 3.2.3. Otras agencias

Existen, por supuesto, muchas otras agencias con satélites meteorológicos pero en este informe no se van a tratar todas ellas, se van a tener en cuenta aquellas más propias para el desarrollo de nuestro trabajo. Aquí se dejan mencionadas estas agencias pertenecientes al grupo de coordinación de satélites meteorológicos (CGMS) (<https://cgms-info.org/>) :

- China Meteorological Administration, CNES, India Meteorological Department, Japan Meteorological Agency, Korean Meteorological Administration.

Cabe mencionar también sobre todas estas agencias a ROSCOSMOS, la agencia rusa, que tiene en órbita el programa METEOR, pero no se va a tener en cuenta en este estudio.

### **3.3. Satélites meteorológicos de interés**

Una vez vistas las distintas órbitas y las distintas agencias que ofrecen los satélites se procede a la elección de un satélite para la recepción de una imagen terrestre. En esta sección vamos a estudiar distintas opciones, compararlas y por último realizar una evaluación para empezar el diseño de las antenas que se necesitan para el satélite escogido.

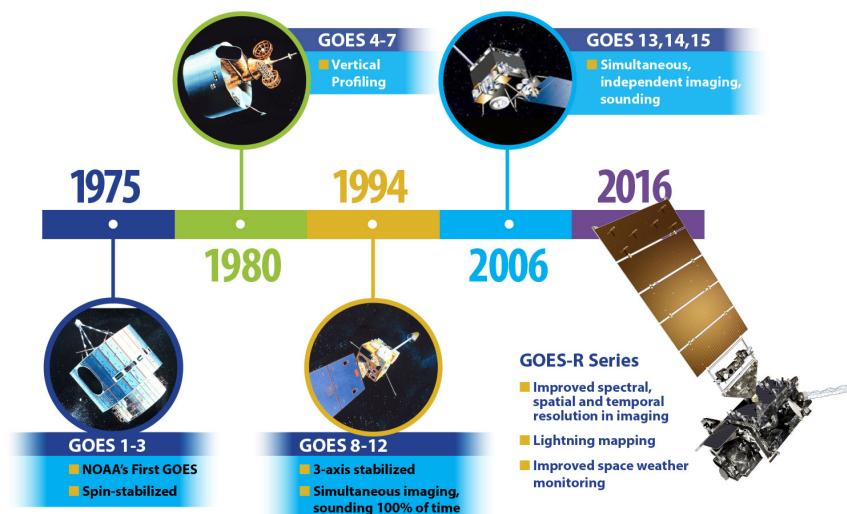
#### **3.3.1. GOES**

La serie de satélites geoestacionarios más sofisticados son conocidos como la "GOES-R series". Provee de imágenes avanzadas y mediciones atmosféricas del hemisferio occidental del planeta en tiempo real. GOES son las siglas de Geostationary Operational Environmental Satellite, y ya se encuentra en la tercera generación. Como son geoestacionarios y van a la misma velocidad angular que la Tierra ofrecen una cobertura constante de un área durante el tiempo.

El programa GOES-R es un esfuerzo colaborativo entre NOAA y la NASA. La NASA construye y lanza al espacio los satélites y luego la NOAA se encarga de operarlos y distribuir los datos a todo el mundo.

Los satélites GOES activos son:

- GOES-16
- GOES-17
- GOES-18
- GOES-U: será lanzado en 2024



**Figura 17:** Imagen extraída de <https://www.goes-r.gov/mission/history.html>

## GOES-17

Se ha tomado el satélite GOES-17 para evaluarse como una de las opciones para recibir señales satélite.

El GOES-17 es el segundo satélite de la tercera generación GOES. Fue lanzado en 2018 y está previsto que esté operativo hasta 2029. Este tipo de satélite geoestacionario realiza imágenes cada 30s y las transmite a la Tierra. Las imágenes son de buena calidad y se pueden apreciar el "full-disk" (imagen completa de una cara terrestre).



**Figura 18:** Imagen full disk de la Tierra [3]

El GOES-17 utiliza una señal llamada HRIT, de la que podríamos decodificar las imágenes que queremos. En la figura 6 podemos ver las frecuencias de esa recepción.

- Frequencies for scientific data acquisition and communication services at ground stations

Service	Direction	Frequency (MHz)	Bandwidth (kHz)	Polarisation	D/A	Data rate (kbps) or Baseband (kHz)	Comments
Raw Data Link	S-E	8220 MHz	120000 kHz	linear	D	120000 kbps	Raw data
GRB	E-S	7216.6 MHz	10900 kHz	RHCP&LHCP	D	17332 kbps	Processed images/soundings
GRB	E-S	7216.6 MHz	9790 kHz	RHCP&LHCP	D	23480 kbps	Processed images/soundings
GRB	S-E	1686.6 MHz	10900 kHz	RHCP&LHCP	D	17332 kbps	Processed images/soundings
GRB	S-E	1686.6 MHz	9790 kHz	RHCP&LHCP	D	23480 kbps	Processed images/soundings
HRIT/EMWIN	E-S	2027.1 MHz	1206 kHz	linear	D	927 kbps	Selected data and information
HRIT/EMWIN	S-E	1694.1 MHz	1210 kHz	linear	D	927 kbps	Selected data and information

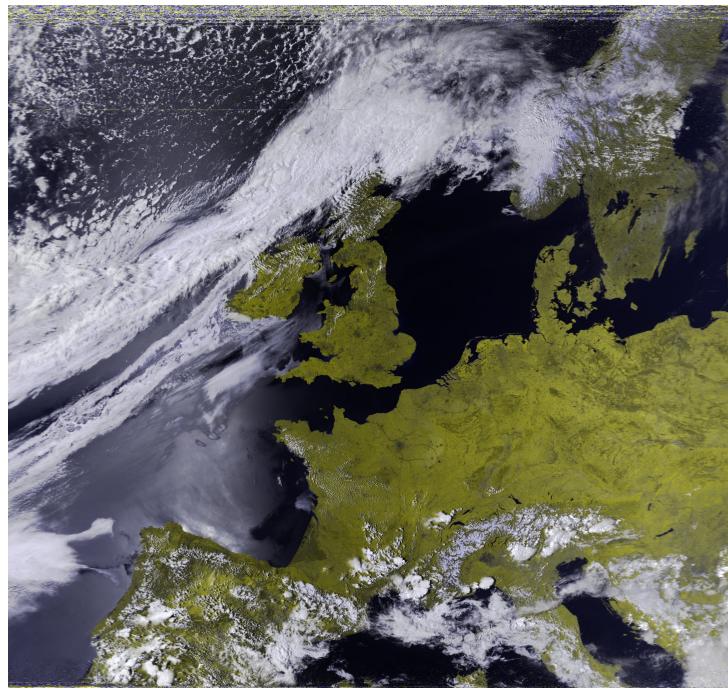
**Tabla 2:** Tabla de frecuencias del GOES 17 [8]

### 3.3.2. NOAA

Los satélites NOAA forman parte del proyecto POES (Polar Orbit Environmental Satellite). Este proyecto consiste en una constelación de satélites meteorológicos que orbitan órbitas polares. Los satélites NOAA fueron una colaboración entre la NASA y la ESA para conseguir ponerlos en órbita, una vez ya en órbita sería la NOAA la encargada de operar estos satélites.

#### NOAA-19

National Oceanic and Atmospheric Administration - 19 es el quinto satélite de la quinta generación de los NOAA. Como sus hermanos, se encarga de operar en meteorología. Fue lanzado al espacio en 2009 y se espera que tenga una vida útil hasta 2024. Como ya sabemos, estos satélites orbitan en la órbita polar (LEO), en concreto este se encuentra a 870 km y es por eso que toma imágenes muy cercanas a la Tierra.



**Figura 19:** Imagen HRPT del NOAA-19 [4]

El NOAA 19 utiliza dos señales para mandar las imágenes de la Tierra: APT (Automatic Transmission Picture) y HRPT (High Resolution Transmission Picture). Para señales en estaciones meteorológicas se utilizan las siguientes frecuencias:

Frequencies for scientific data acquisition and communication services at ground stations

Service	Direction	Frequency (MHz)	Bandwidth (kHz)	Polarisation	D/A	Data rate (kbps) or Baseband (kHz)	Comments
CDA	S-E	2247.5 MHz	2000 kHz	RHCP	D	2660 kbps	Global and Local data (GAC and LAC)
HRPT	S-E	1702.5 MHz	4000 kHz	LHCP	D	665 kbps	Full information data
HRPT	S-E	1698 MHz	4000 kHz	RHCP	D	665 kbps	Full information data
HRPT	S-E	1707 MHz	4000 kHz	RHCP	D	665 kbps	Full information data
APT	S-E	137.35 MHz	38 kHz	RHCP	A	1.7 kHz	Reduced resolution images
APT	S-E	137.77 MHz	38 kHz	RHCP	A	1.7 kHz	Reduced resolution images
APT	S-E	137.1 MHz	38 kHz	RHCP	A	1.7 kHz	Reduced resolution images
APT	S-E	137.9125 MHz	38 kHz	RHCP	A	1.7 kHz	Reduced resolution images
DSB	S-E	137.35 MHz	46 kHz	RHCP	D	8.32 kbps	TIP data
DSB	S-E	137.77 MHz	46 kHz	RHCP	D	8.32 kbps	TIP data

**Tabla 3:** Tabla de frecuencias NOAA-19 [8]

### 3.3.3. METEOSAT/METOP

Estos satélites pertenecen a EUMETSAT. METEOSAT es la familia de satélites geoestacionarios meteorológicos de EUMETSAT. Se encuentran sobre Europa y son puestos en órbita por la ESA. METOP es la familia de satélites de órbita polar meteorológicos de EUMETSAT. Al igual que los METEOSAT también son puestos en órbita por la ESA.

No se va a profundizar mucho acerca de estos satélites ya que sus comunicaciones están encriptadas y no se pueden decodificar a no ser que te de una licencia EUMETSAT y un software especial, pero son dignos de mencionar.

## 3.4. Decisión sobre el satélite a recibir

Una vez vistas las órbitas de los satélites, las distintas agencias y distintos satélites meteorológicos, a continuación, se presenta una comparativa para tomar una decisión sobre qué satélite es el indicado para realizar nuestro estudio.

En este caso cualquiera de los satélites se podrían recibir con el esfuerzo requerido para cada uno de ellos. Sin embargo, hay varios aspectos que nos hacen escoger la familia NOAA como el mejor candidato para obtener resultados. Los satélites escogidos son el NOAA-19, GOES-17 y el METEOSAT-11.

	NOAA-19	GOES-17	METEOSAT-11
ÓRBITA	Polar	Geoestacionaria	Geoestacionaria
SEÑAL TRANSMITIDA	APT(137.5 MHz) HRPT(1698 MHz)	HRIT/EMWIN (2027.1 MHz)	HRIT(1695.15 MHZ) LRIT(1691 MHz)
SEGUIMIENTO DEL SATÉLITE	Necesario	No necesario	No necesario
APROXIMACIÓN DE LA ANTENA NECESITADA	Omnidireccional o directiva	Directiva + Ina	Directiva + Ina
ACCESO A TRANSMISIÓN	Abierto	Abierto	Cifrado

**Tabla 4:** Tabla de comparación de los satélites

El GOES-17 sería una buena opción. Obtiene imágenes "full-disk" de nuestro planeta y es geoestacionario por lo que no hace falta hacer un seguimiento del satélite. Aún así, haría falta encontrarse en territorio americano para poder recibir algo del satélite, además de que como se encuentra a 36000 km la antena y los dispositivos de recepción deberán ser más costosos.

En el caso del METEOSAT-11, sería mejor candidato que el GOES-17 ya que está situado encima de Europa, donde nos encontramos actualmente. El problema de este satélite es que las comunicaciones están cifradas por el EUMETSAT, lo que supondría obtener permisos por parte de la agencia.

Vistas las características, la mejor opción es la del satélite NOAA-19. Es el único de los tres que nos permite recibir una señal APT de 137 MHz, una frecuencia mucho menor que la del resto de satélites por lo que la recepción se facilita mucho. El problema del seguimiento del satélite se puede resolver mediante una antena omnidireccional o simplemente con un software de seguimiento, apuntando aproximadamente al satélite mientras pasa por encima de nuestra zona.

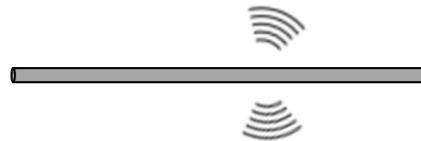
Es por eso que el objetivo establecido es el de la recepción de una señal APT del satélite NOAA-19. Se podrá recibir del NOAA-15 y del NOAA-18 también, que siguen activos y la recepción es similar.

## 4. Estudio teórico y simulación de las antenas

En esta sección, se va a llevar a cabo un estudio teórico de las antenas que se utilizan para la recepción de satélites NOAA y posteriormente una simulación con el software comercial electromagnético CST studio de las antenas de interés.

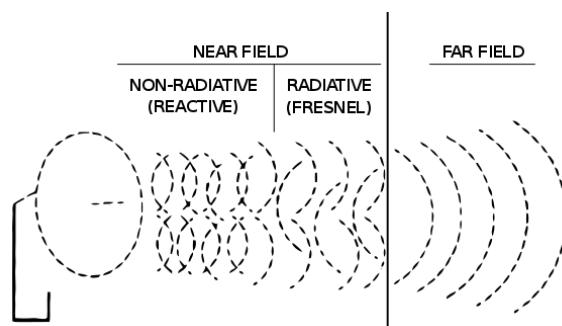
### 4.1. ¿Qué es una antena?

Una antena es un dispositivo metalodieléctrico (como una varilla o un cable) capaz de radiar y recibir ondas electromagnéticas. Si nosotros aplicamos a ese dispositivo metálico una corriente alterna podremos transmitir señales electromagnéticas, y con el mismo circuito, también podremos recibirlas. Además las antenas cumplen con el teorema de la reciprocidad, es decir, transmiten y reciben con las mismas propiedades electromagnéticas.



**Figura 20:** Elemento metálico radiando

El uso más común de estos dispositivos reside en la creación de un frente de ondas plano fuera de la zona de Fraunhofer, y que esa onda pueda ser recibida por el elemento receptor a la distancia requerida. La zona de Fraunhofer se define matemáticamente como: Campo Lejano  $\geq \frac{2D^2}{\lambda}$ , donde D es el tamaño máximo de la antena y  $\lambda$  la longitud de onda.



**Figura 21:** Zona de campo lejano o de Fraunhofer [5]

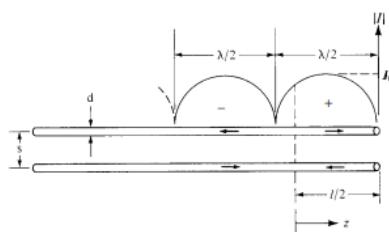
## 4.2. Características principales de una antena

Para poder comprender esta sección es necesario definir cuáles son las principales características de una antena y por qué distintas antenas funcionan de manera diferente.

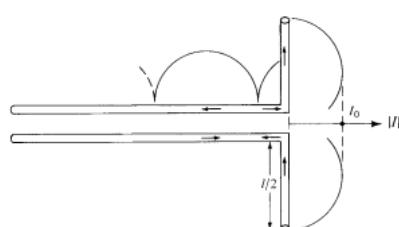
### 4.2.1. Frecuencia de operación

Todas las antenas están diseñadas para operar en un rango de frecuencias determinadas. La frecuencia a la que resuena nuestra antena es el motivo por el que podemos distinguir la información. De manera matemática, la distinguimos mediante la transformada de Fourier, y de manera física con circuitos resonantes a esas frecuencias (como puede ser la propia antena).

Una antena puede resonar a distintas frecuencias dependiendo de la longitud eléctrica que tenga esa antena. La longitud eléctrica es la longitud física de la antena medida con respecto a las longitudes de onda de la onda que queramos transmitir. Longitud eléctrica:  $L_{\text{eléctrica}} = \frac{L_{\text{física}}}{\lambda}$ . En la Figura 22 podemos observar la distribución de una señal de corriente a lo largo de un conductor. Si el conductor es del tamaño de un múltiplo de  $\lambda/2$ , por ejemplo doblando el cable con esa longitud, se creará un frente de onda como se aprecia en la Figura 23.



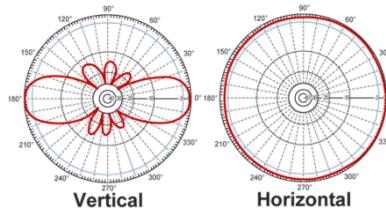
**Figura 22:** Distribución de corriente en un cable [5]



**Figura 23:** Distribución de corriente en un cable doblado [5]

#### 4.2.2. Diagrama de radiación

Cuando tenemos un elemento que radia, podemos comprender cómo se está distribuyendo la energía radiada mediante el diagrama de radiación. El diagrama de radiación puede ser representado de muchas formas. La más usual es en 2D en polares, viendo el plano que nos muestre mejor el comportamiento de la antena.

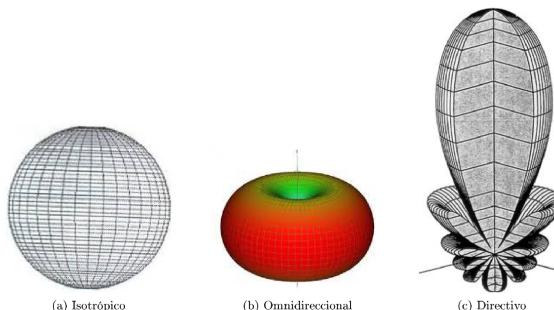


**Figura 24:** Diagrama de radiación de una antena en sus cortes 2D horizontal y vertical.

#### 4.2.3. Directividad

Es el parámetro de las antenas que nos permite medir cómo de concentrada está la energía radiada o recibida en una determinada dirección. Se mide como la relación entre la intensidad máxima de radiación en una dirección determinada con la radiación que tendría una antena isotrópica (una antena que irradia energía uniformemente en todas las direcciones) bajo las mismas condiciones. Según la directividad de una antena nos encontraremos con tres tipos diferentes de diagramas de radiación: isotrópico, omnidireccional o directivo.

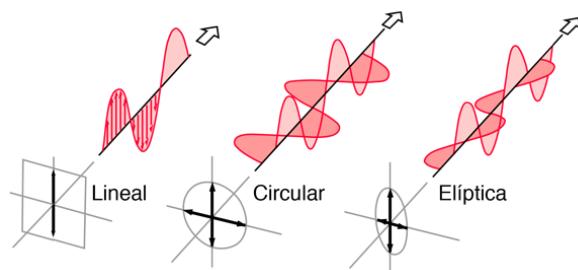
$$D(\theta, \varphi) = \frac{I(\theta, \varphi)}{I_{\text{ISO}}}$$



**Figura 25:** Diagrama de radiación de una antena según su directividad [6]

#### 4.2.4. Polarización

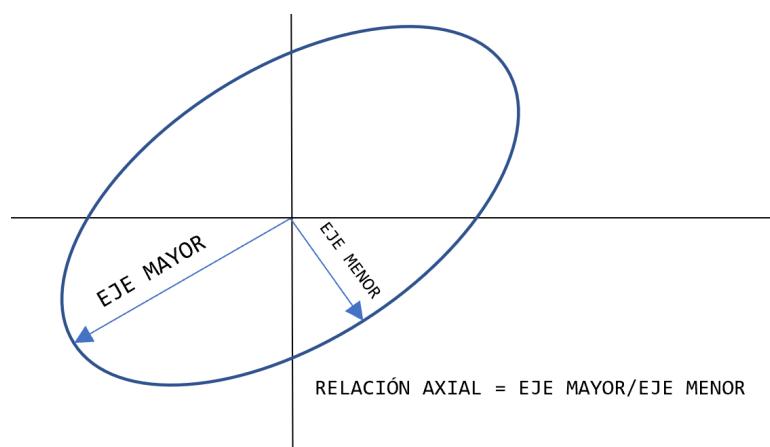
La polarización es la orientación del campo eléctrico cuando se propaga por un medio. Si el campo no está rotando la polarización es lineal. Si el campo está rotando la polarización puede ser circular a derechas o circular a izquierdas, dependiendo del sentido de rotación. Si los módulos de campo eléctrico y magnético no son iguales entonces la polarización circular será elíptica.



**Figura 26:** Tipos de polarización [7]

#### 4.2.5. Relación axial

La relación axial es un parámetro que mide la relación entre el eje mayor y menor de la elipse en una polarización elíptica. Este valor va de 1, que es una polarización circular, hasta infinito, que sería una polarización lineal.



**Figura 27:** Relación axial de una antena

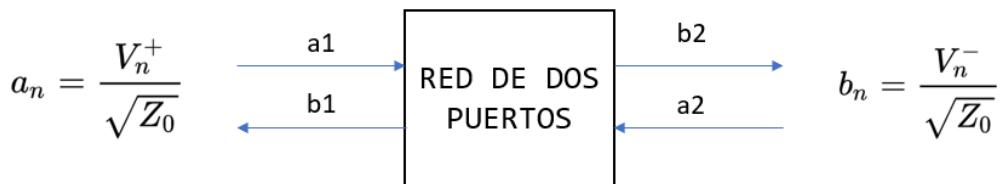
#### 4.2.6. Impedancia y parámetro S11

La impedancia es la oposición que presenta nuestra antena al flujo de corriente. Para que nuestra antena funcione correctamente, la impedancia del sistema de transmisión (en nuestro caso un cable coaxial) y la impedancia de la antena deben ser iguales. De esta manera conseguiremos una adaptación de impedancias.



**Figura 28:** Adaptación de impedancia a una antena

Estos sistemas pueden definirse en una red de dos puertos, donde establecemos dos parámetros, a y b. a es la onda potencia incidente, y la b es la onda de potencia reflejada. Una onda de potencia es una versión normalizada (respecto a la impedancia característica  $Z_0$ ) de las ondas viajeras de tensión incidente y reflejada correspondientes,  $V_n^+$  y  $V_n^-$ . Po-



**Figura 29:** Red de dos puertos

demos definir entonces una relación entre a y b de cada puerto mediante los términos de la matriz de parámetros-S. El parámetro que nos interesa es el que relaciona la potencia incidente de entrada con la potencia reflejada, que es el  $S_{11}$ . Existe un término ingenieril que describe el ancho de banda de operación de una antena, que son las frecuencias que cumplen  $|S_{11}| < 10 \text{ dB}$ .

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} = \frac{V_1^-}{V_1^+} \quad (4.1)$$

### 4.3. Parámetros del NOAA-19

Para escoger una serie de antenas para optimizar la recepción del NOAA, es necesario primero conocer una serie de parámetros de nuestros satélites. Se ha escogido el NOAA-19. En este trabajo se realizará una recepción APT.

POTENCIA DE TRANSMISIÓN	833 W
ALTITUD	870 km
FRECUENCIAS APT RHCP(MHz)	137.1 137.5 137.77 137.9125
FRECUENCIAS HRPT RHCP(MHz)	1698 1702.5 (LHCP) 1707
ÓRBITA	Polar/Heliosíncrona

**Tabla 5:** Tabla de parámetros útiles del NOAA-19

### 4.4. Antenas para la recepción de satélites NOAA

Las características observadas en la tabla anterior sugieren la elección de antenas con los siguientes requisitos:

- Antena omnidireccional: Debido a la órbita polar este satélite tarda unos 10 minutos en recorrer la zona en la que podemos observarlo. Esto significa que se mueve rápido en el cielo y es una ventaja q nuestra antena sea lo más omnidireccional posible para no tener que hacer un seguimiento del satélite.
- Antena con polarización circular a derechas: La señal que nos llega está polarizada circularmente a derechas. Si no escogemos una antena con la misma polarización tendremos pérdidas. En el caso de escoger uan antena polarizada linealmente perderemos la mitad de la señal, lo que traduce en 3 dB. En el caso de tener una polarización circular a izquierdas tendremos pérdidas en función de las pérdidas de polarización cruzada.

Sabiendo cuáles son los requisitos a cumplir, podemos pasar a detallar aquellas antenas que podemos usar para recibir [17].

#### 4.5. Antena Cuadrifilar Helicoidal

En inglés es conocida como QFH Antenna. Esta antena es la más recomendada para la recepción de APT de los NOAA. Está fundamentada en la radiación de dos espiras transversales, que para conseguir una polarización circular, son dobladas. Su utilidad es generalmente en la banda de frecuencias VHF con buena ganancia. Esta antena cuenta con un rango de recepción de horizonte a horizonte con gran ancho de banda, permitiéndole recibir satélites durante toda su pasada, proporcionando una imagen nítida y detallada de lo que está pasando en la superficie terrestre [18].



**Figura 30:** Antena Cuadrifilar Helicoidal

#### 4.6. Turnstile Antenna

Esta antena consiste en dos dipolos idénticos en ángulo recto alimentados en cuadratura de fase. Cuando la antena se monta horizontalmente parece un torno (Turnstile en inglés). Tiene dos modos, modo normal y modo axial. Es el modo axial el que nos interesa porque de esta manera la antena radia con polarización circular [19].



**Figura 31:** Antena Turnstile

#### 4.7. V dipole

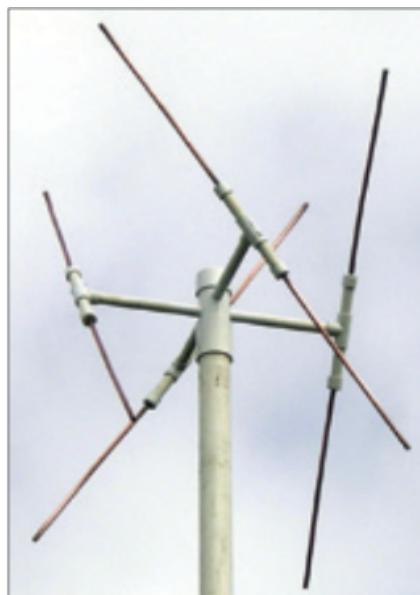
El dipolo en V es un dipolo simple al que se le abren los brazos para que forme un ángulo de unos  $120^{\circ}$ . Aunque su diseño es muy simple, los radioaficionados reportan que este tipo de antena llega a recibir estos satélites meteorológicos sorprendentemente bien a pesar de no ser ni omnidireccional ni tener polarización a derechas. [5]



**Figura 32:** Antena Dipolo en V

#### 4.8. Double Cross Antenna

Consiste en cuatro dipolos colocados en las caras verticales de un cubo. Para alimentar esta antena, debemos tener los dipolos enfrentados en un desfase de 90 grados. Por ese desfase, esta antena recoge muy bien la polarización circular y es una de las mejores opciones para los NOAA. Es más difícil de implementar que una antena turnstile y los resultados son similares [20].



**Figura 33:** Double Cross Antenna

#### 4.9. Antenas utilizadas en el trabajo

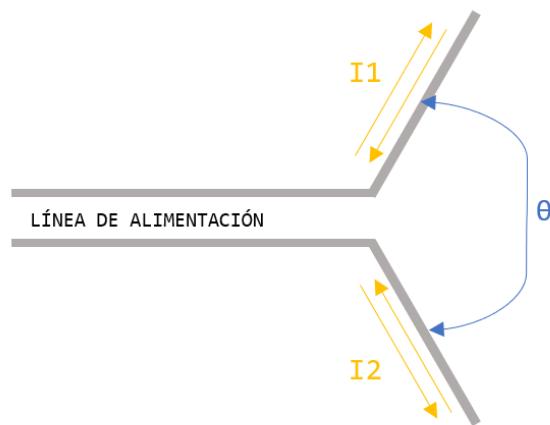
Finalmente, las antenas que vamos a diseñar son el dipolo en V y la antena Turnstile. El motivo para escoger estas antenas es el de poder comparar una recepción con polarización lineal y otra con polarización circular a derechas. Además, la razón para escoger la turnstile con respecto a las otras dos antenas es que es más sencilla de construir y los resultados obtenidos siguen siendo muy buenos, optimizando el tiempo y el coste de nuestro trabajo.

## 5. Diseño de antenas para la recepción meteorológica

Sabiendo ya las antenas que son más indicadas para la recepción del satélite, se va a proceder a realizar una simulación 3D del funcionamiento de estas antenas para su mayor comprensión. Se va a realizar un diseño **software mediante modelado 3D** de cada una de las antenas y luego se va a proceder a la alimentación de estas antenas.

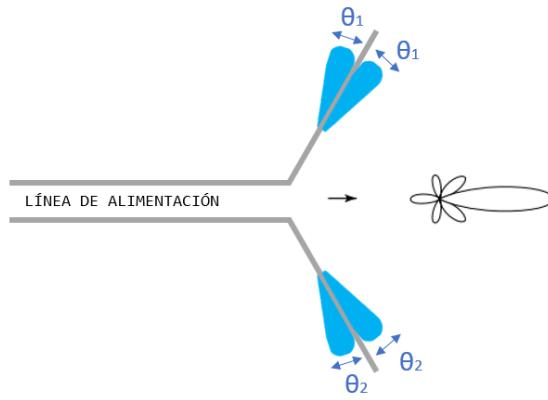
### 5.1. Diseño del Dipolo en V

El dipolo en V es una antena de hilo cuyos brazos se encuentran rotados un determinado ángulo  $\theta$ , donde los dos elementos radiantes se extienden desde un punto de alimentación central. Cada brazo del dipolo mide  $\lambda/4$ , y en función del grado de rotación que apliquemos entre los dos brazos obtendremos un funcionamiento diferente.



**Figura 34:** Modelado del dipolo en V

El dipolo en V puede usarse para distintos servicios, por lo que debemos contemplar los distintos modelos de funcionamiento que ofrece esta antena. Si el ángulo de separación  $\theta = \theta_1 + \theta_2$  es igual al ancho de haz de los brazos del dipolo (estamos estudiando el caso simétrico), entonces estamos trabajando en el modo directivo de la antena.

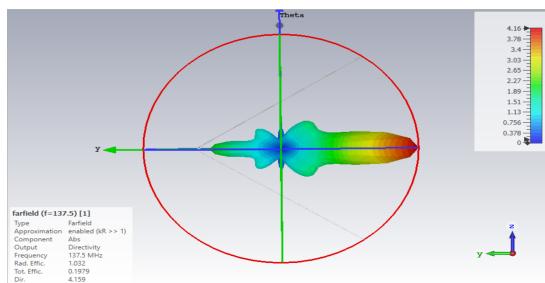


**Figura 35:** Dipolo en V operando en modo directivo

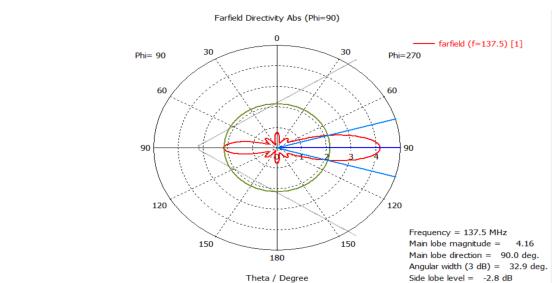
El libro balanis ofrece unas aproximaciones para saber el ángulo de longitud en función de la relación longitud y longitud de onda que tengamos, si hacemos los cálculos conseguimos la máxima directividad.

$$\theta = \begin{cases} -149.3 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^3 + 603.4 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 - 809.5 \left(\frac{l}{\lambda}\right) + 443.6, & \text{para } 0.5 \leq \frac{l}{\lambda} \leq 1.5 \\ 13.39 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 - 78.27 \left(\frac{l}{\lambda}\right) + 169.77, & \text{para } 1.5 \leq \frac{l}{\lambda} \leq 3 \end{cases} \quad (5.1)$$

Para asegurarnos de que esto es cierto se ha realizado la simulación en el CST para nuestro caso, una antena de 137.5 MHz, de una relación  $l/\lambda = 2$ , es decir, una longitud de 4.36 m. Obtenemos un ángulo de apertura del dipolo de  $66.79^\circ$ .



(a) Diagrama de radiación 3D del Dipolo V con Longitud = 4,36m y Apertura =  $66,79^\circ$



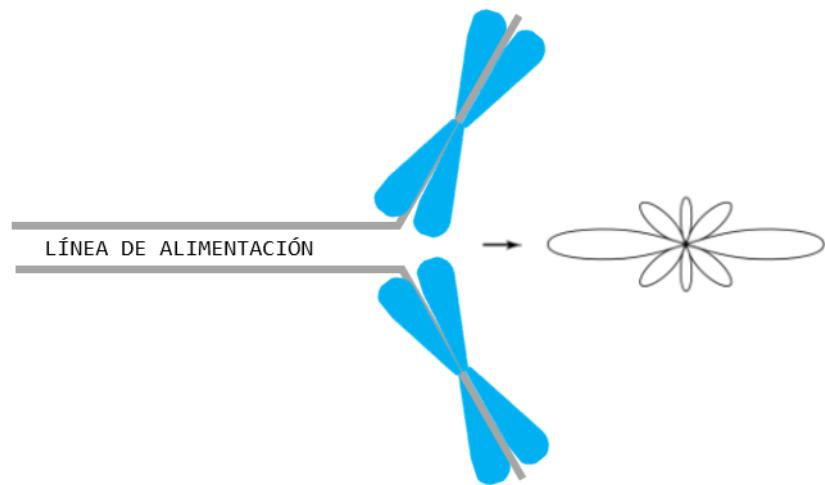
(b) Diagrama de radiación 1D del Dipolo V con Longitud = 4,36m y Apertura =  $66,79^\circ$

**Figura 36:** Diagramas de radiación del dipolo en V directivo

Este modo de funcionamiento del dipolo en V no nos interesa, ya que nosotros queremos un dipolo que sea más omnidireccional. Esto es debido a que los satélites NOAA se

encuentran a muy poca altura y realizan una pasada muy rápida sobre nuestra localización. En la recepción para satélites meteorológicos este modo de funcionamiento no va a suponer un problema. Se puede observar que la longitud de la antena para que radie unidireccionalmente tiene que ser muy grande, siendo un brazo entero un conductor de 4.36 m.

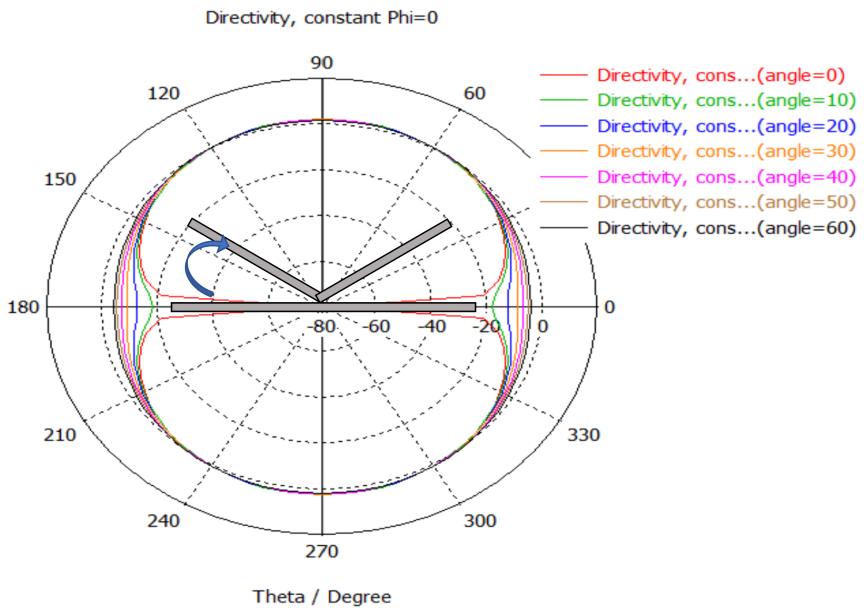
El modo de funcionamiento que nos interesa es el bidireccional, este se produce cuando no se cumple la condición de unidireccionalidad.



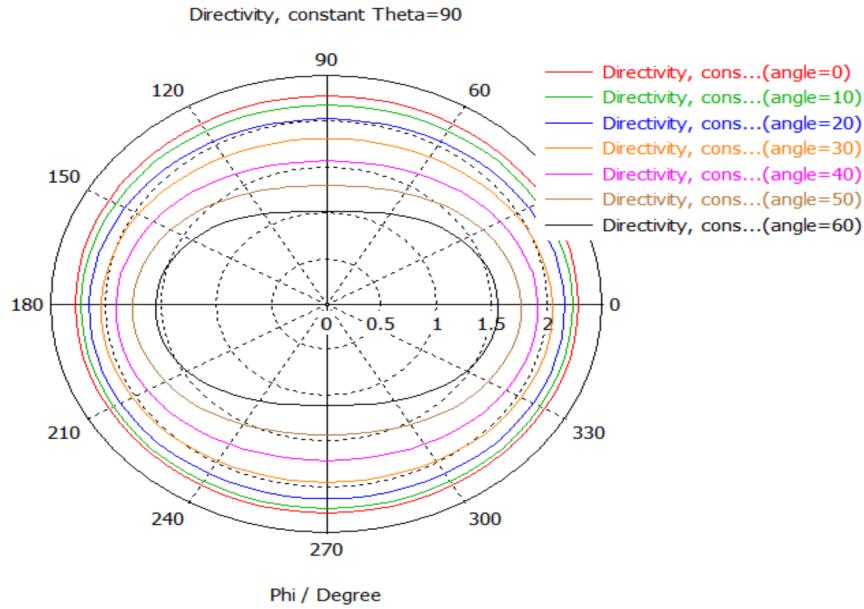
**Figura 37:** Modelado del dipolo en V bidireccional

Llegado a este punto nos podemos estar preguntando, ¿por qué usar un dipolo en V en vez de un dipolo convencional (sin doblar)? Esta respuesta se contesta simulando un dipolo  $\lambda/2$  básico y empezando a rotar los brazos del dipolo, así podremos comparar los diagramas de radiación y las directividades, obteniendo el que más nos interese.

Para la simulación la frecuencia será de 137.5 MHz y la longitud del dipolo será  $\lambda/2$ .



**Figura 38:** Diagramas de radiación con  $\phi = 0$  según la rotación del dipolo en V



**Figura 39:** Diagramas de radiación en  $\theta = 0$  según la rotación del dipolo en V

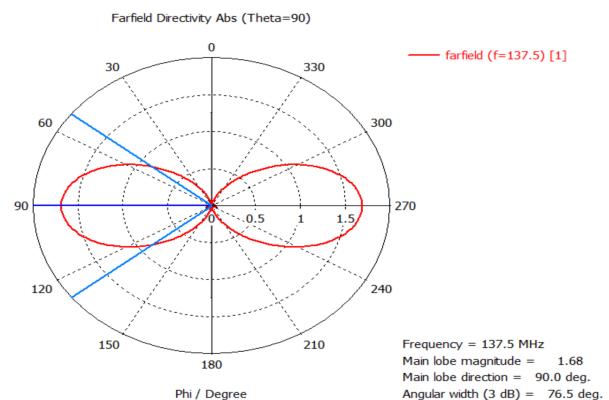
Los brazos del dipolo empiezan estando situados de  $\theta = 0^\circ$  a  $\theta = 180^\circ$ , y se van inclinando un ángulo con respecto a esa horizontal. El dipolo con  $\text{angle}=0^\circ$  sería el dipolo convencional, que no está doblado en V.

Se puede observar en la gráfica en  $\phi$  constante (Figura 38) que existen unos ceros, que se van eliminando según rotamos los brazos del dipolo. Es esta la razón por la que vamos

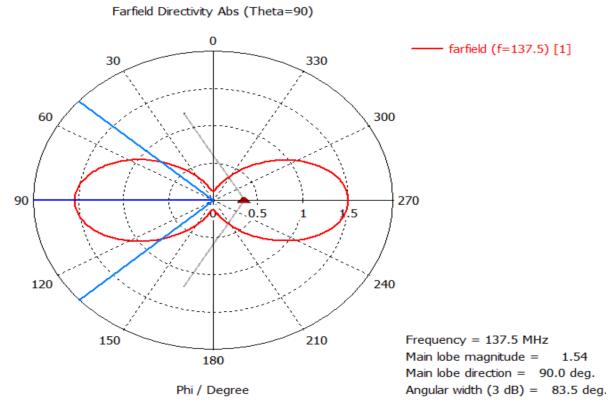
a utilizar un dipolo en V y no un dipolo convencional. El dipolo en V nos permite eliminar los ceros del diagrama de radiación, evitando así una completa pérdida de la señal.

En la gráfica en  $\theta$  constante (Figura 39) se puede observar el diagrama de radiación. En este diagrama podemos concluir que cuanto más cerramos el dipolo menos directividad tendrá, que es la directividad que perdemos a costa de cerrar esos nulos en el diagrama de radiación  $\phi$ .

Para la construcción de nuestra antena, hay que encontrar un compromiso entre cerrar esos ceros y no perder mucha directividad. Escogemos entonces una apertura de  $120^\circ$  entre los brazos ( $30^\circ$  en la variable angle). Comparamos estos dos dipolos:



(a) Diagrama del dipolo estándar a 137.5 MHz con  $\theta=90^\circ$

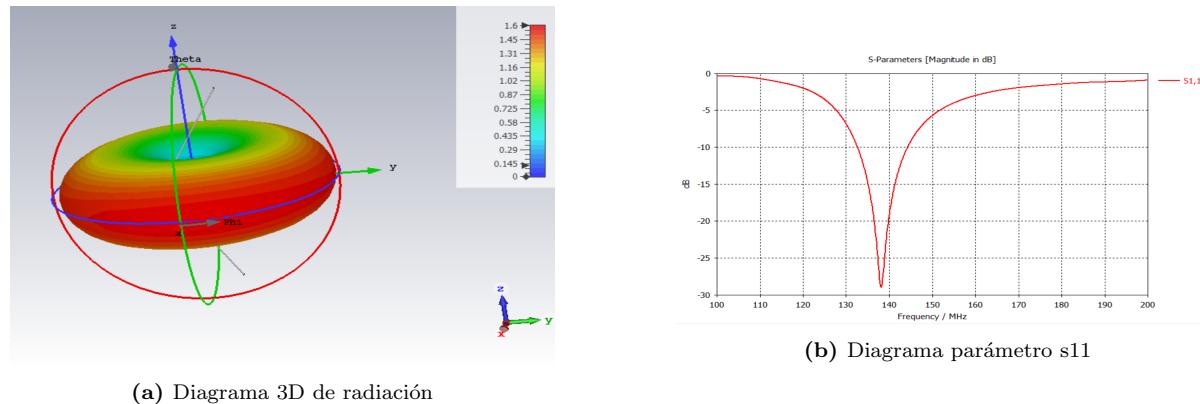


(b) Diagrama del dipolo V a 137.5 MHz con  $\theta=90^\circ$

**Figura 40:** Comparación de diagramas de radiación entre el dipolo estándar y el dipolo en V

Por último realizamos la simulación completa de este dipolo en 3D, con todos los parámetros de campo lejano.

### 5.1.1. Simulación del dipolo en V, con apertura de 120º a 137.5 MHz



**Figura 41:** Simulación del dipolo en V 120º a 137.5 MHz

Nótese que, para que el parámetro  $S_{11}$  coincidiera con 137.5MHz, y así resuene nuestra antena a la frecuencia deseada se ha reducido el tamaño total del dipolo a 96 cm. Esto se produce porque, tanto en simulaciones como en los casos reales, los parámetros S se desplazan ligeramente del valor teórico, por lo que hay que corregirlos.

### 5.1.2. Adición de un balun

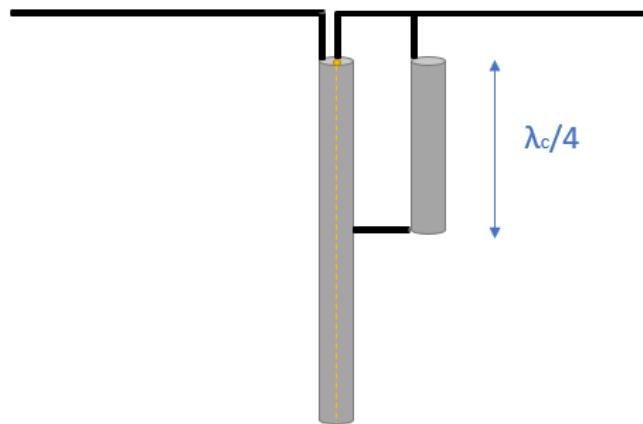
Un balun es un dispositivo que se utiliza para conectar una línea de transmisión no balanceada a una carga balanceada, o viceversa. La palabra balun es una contracción de "balanced-unbalanced". Los baluns se utilizan comúnmente en sistemas de antena para convertir la señal de un transmisor de radio de un cable coaxial no balanceado a una antena balanceada, o para convertir la señal de una antena balanceada a un receptor de radio no balanceado [5].

En nuestro caso, es necesaria la implementación de un balun para que circule la misma corriente por los dos brazos del dipolo. Si no implementásemos un balun y las corrientes de los brazos de los dipolos fueran distintas, el diagrama de radiación de nuestro dipolo no sería simétrico, y tendríamos un lóbulo más grande que el otro. Esto se produce porque

la intensidad de corriente que va por el activo de un coaxial no es la misma que la de la malla, provocando esta asimetría.

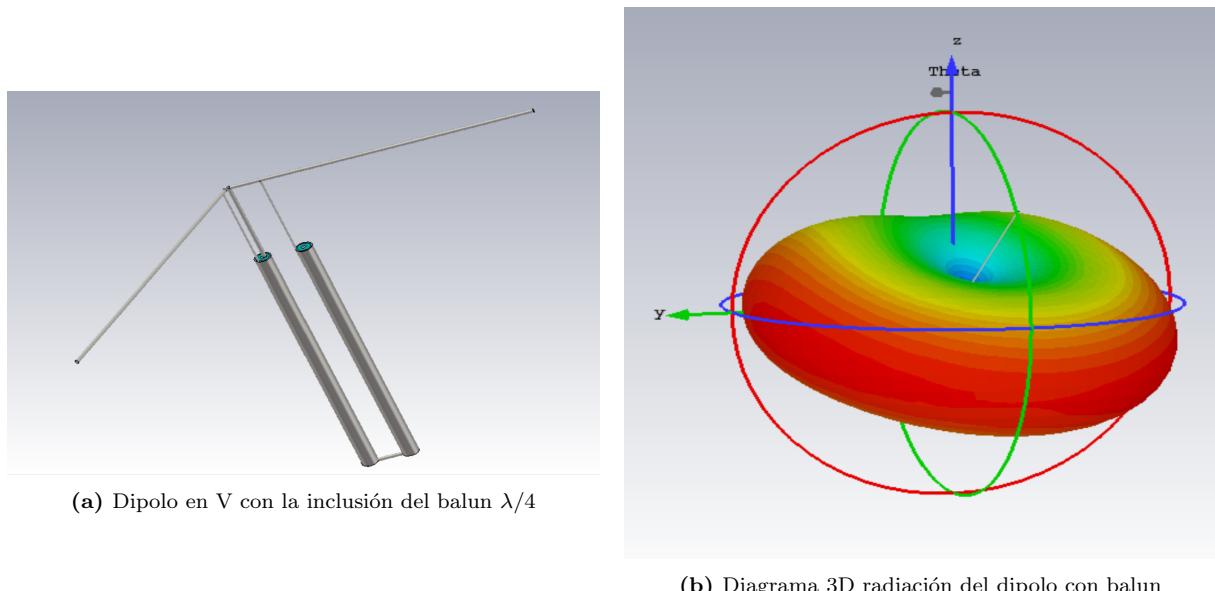
Hay distintos tipos de balun, que pueden alterar nuestra impedancia de entrada o modificar la señal de distintas maneras. Para el dipolo en V hemos escogido el siguiente balun 1:1 (que no altere la impedancia) que se construye añadiendo  $\lambda/4$  de coaxial a un brazo. Una  $\lambda_c$  es la longitud de la onda electromagnética dentro del coaxial, que dependerá de la constante dieléctrica del coaxial que se use.

$$\lambda_c = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (5.2)$$

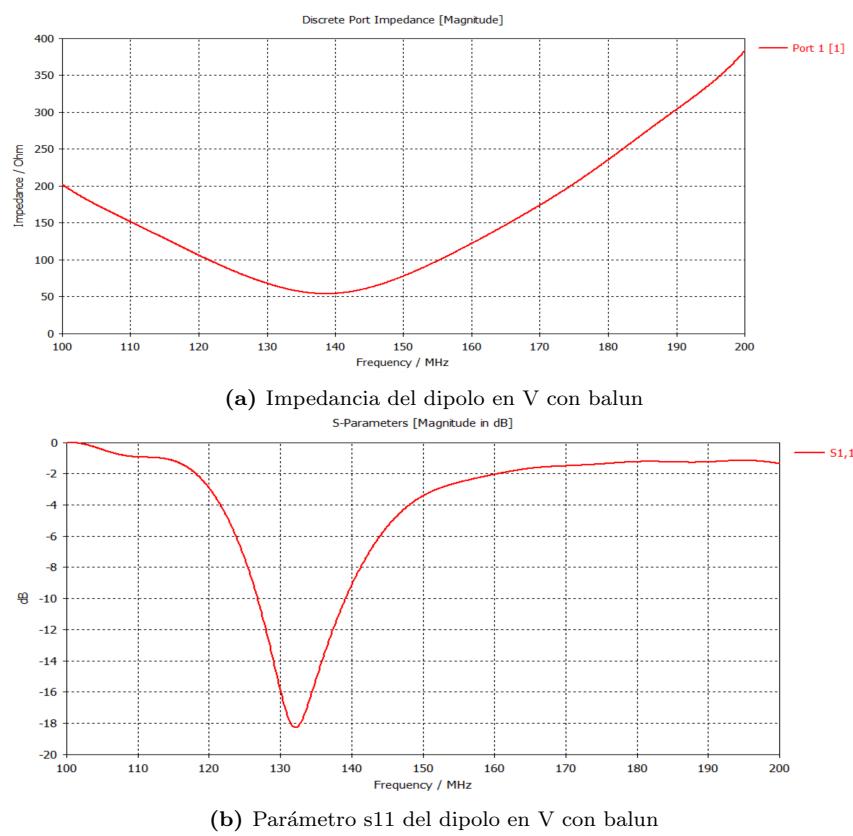


**Figura 42:** Balun  $\lambda/4$  1:1

Para simular el balun, modelamos en el CST un balun con coaxiales como se indica en la Figura 42. El resultado se muestra en la Figura 43. Para saber si hemos diseñado bien el balun, nos fijaremos en que el valor de impedancia se haya quedado como estaba, en este caso alrededor de 50 ohmios (Figura 44(a)), y que sigue resonando a la frecuencia de 137 MHz (Figura 44(b)). Además con el parámetro  $S_{11}$  calculamos un ancho de banda de operación aproximado de nuestra antena, que sería de 126 MHz a 140 MHz (Figura 44).



**Figura 43:** Simulación del dipolo en V con balun



**Figura 44:** Parámetros del dipolo en V con balun

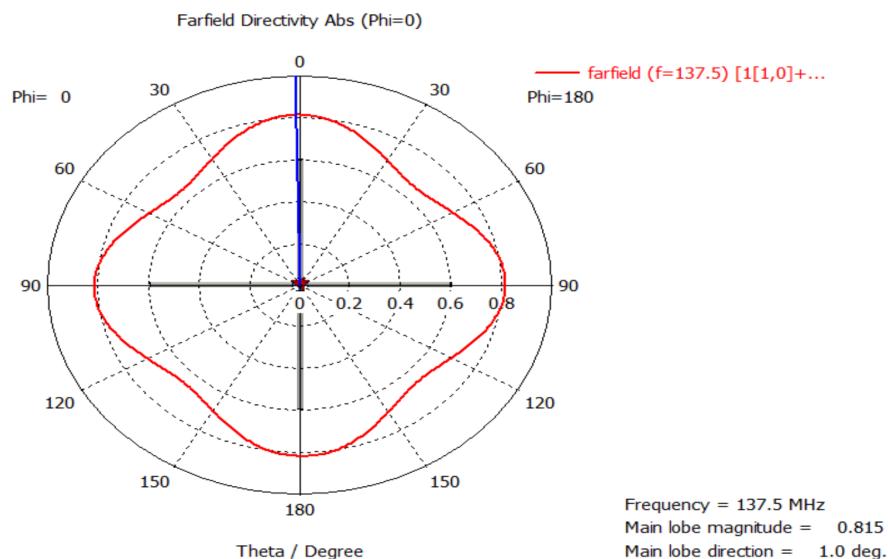
## 5.2. Diseño de la antena Turnstile

La **antena Turnstile** [19], o antena de torniquete o dipolo cruzado es una antena compuesta por dos dipolos, colocados en 90º. Esta antena es una de las más utilizadas para la recepción de satélites de 137MHz.

La antena de torniquete fue inventada por George Brown en 1935 y puede trabajar en dos modos distintos:

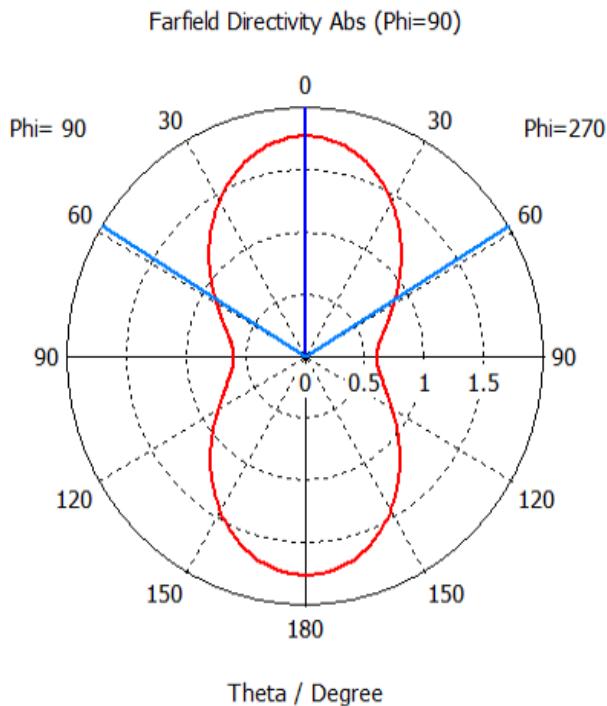
El **modo normal** de la antena consiste en el dipolo cruzado radiando ondas polarizadas linealmente. Horizontalmente, si el plano de la antena está colocado paralelo al suelo, es decir, que su eje sea vertical. A esta antena a menudo se le conoce como antena de torniquete de George Brown, ya que al principio todas las antenas Turnstile se usaban generalmente en este modo.

El diagrama de radiación en este modo es prácticamente omnidireccional. Se puede apreciar en el diagrama de radiación polar que en realidad no es completamente omnidireccional si no que tiene una forma de trébol (Figura 45).



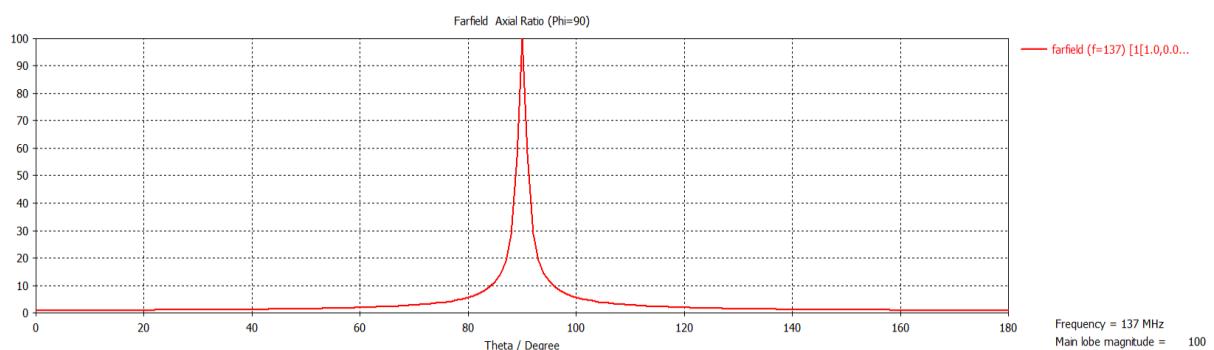
**Figura 45:** Diagrama Turnstile en modo normal

El **modo axial** es en el que vamos a querer trabajar nosotros. Consiste en todas las ondas que radia la antena a lo largo de su eje, es decir, perpendicularmente al plano de los elementos de la antena. Este modo es el que nos interesa ya que de esta manera las ondas tienen una polarización circular, y evitariamos así perder los 3dB que perdíamos con el dipolo en V por polarización lineal.

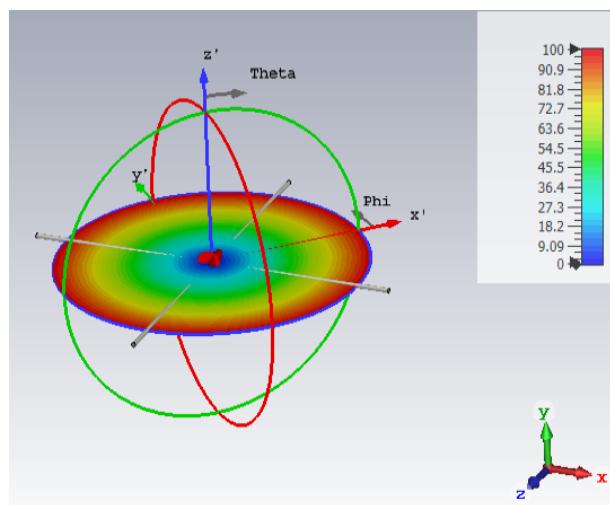


**Figura 46:** Diagrama Turnstile en modo axial

Se puede observar perfectamente los dos modos de funcionamiento de la antena si nos fijamos en su relación axial (axial ratio). En la Figura 47 se presenta la relación axial en dos dimensiones y en la Figura 48 se presenta en tres dimensiones.



**Figura 47:** Relación axial de la antena Turnstile 1D

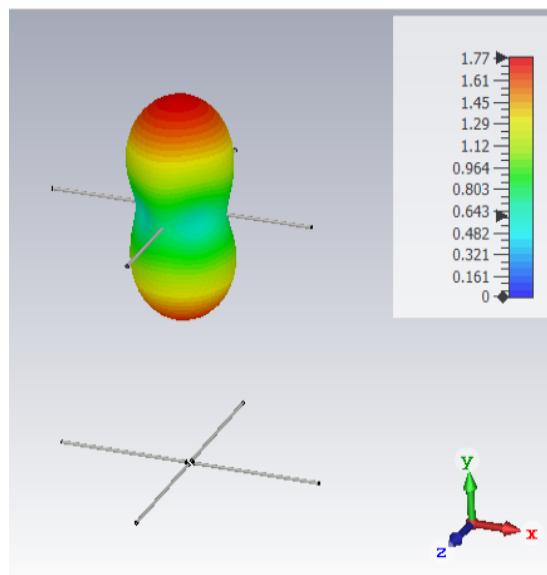


**Figura 48:** Relación axial de la antena Turnstile 3D

Además este tipo de antenas se pueden apilar en un array, aumentando así la directividad del rayo. Esto se produce si en el array todas las pares de dipolos de la turnstile se alimentan. Dependiendo de la separación entre estos dipolos cruzados alimentados la antena tendrá un mejor rendimiento en su modo normal o axial. En este caso si apilamos muchos dipolos cruzados alimentados a  $\lambda/2$  crearemos una antena más directiva, y si los colocamos a  $\lambda/4$  crearemos una antena mucho más omnidireccional.

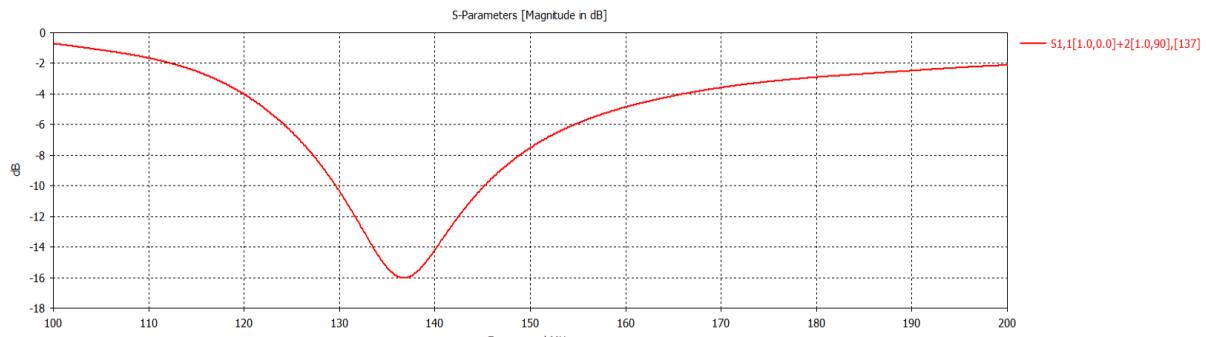
Nosotros vamos a querer trabajar con el modo axial como ya hemos mencionado. Para una buena recepción satelital, nos va a bastar con un par de dipolos cruzados y un plano de tierra que lo van a formar otros dos dipolos situados a  $\lambda$  medios, que actúan como elementos reflectores.

Simulando la antena en CST se puede apreciar que el diagrama de radiación se puede acercar a una radiación omnidireccional (Figura 49), que el axial ratio se cumple para así poder tener una polarización circular a derechas y que está correctamente adaptado para 137 MHz.



**Figura 49:** Diagrama de radiación antena Turnstile con un plano de tierra a  $\lambda/2$

Además con la simulación podemos también observar que está perfectamente adaptado a 137 MHz y que el ancho de banda de operación es aproximadamente de 130 MHz a 145 MHz (Figura 50).

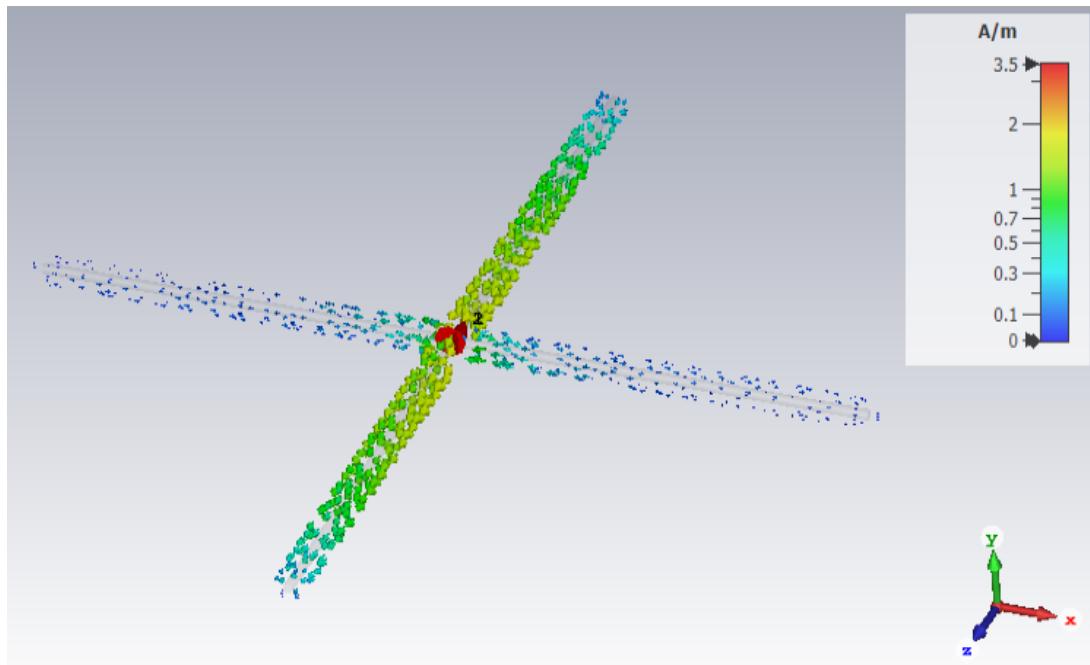


**Figura 50:** Parámetro  $S_{11}$  de la antena Turnstile con plano de tierra a  $\lambda/2$

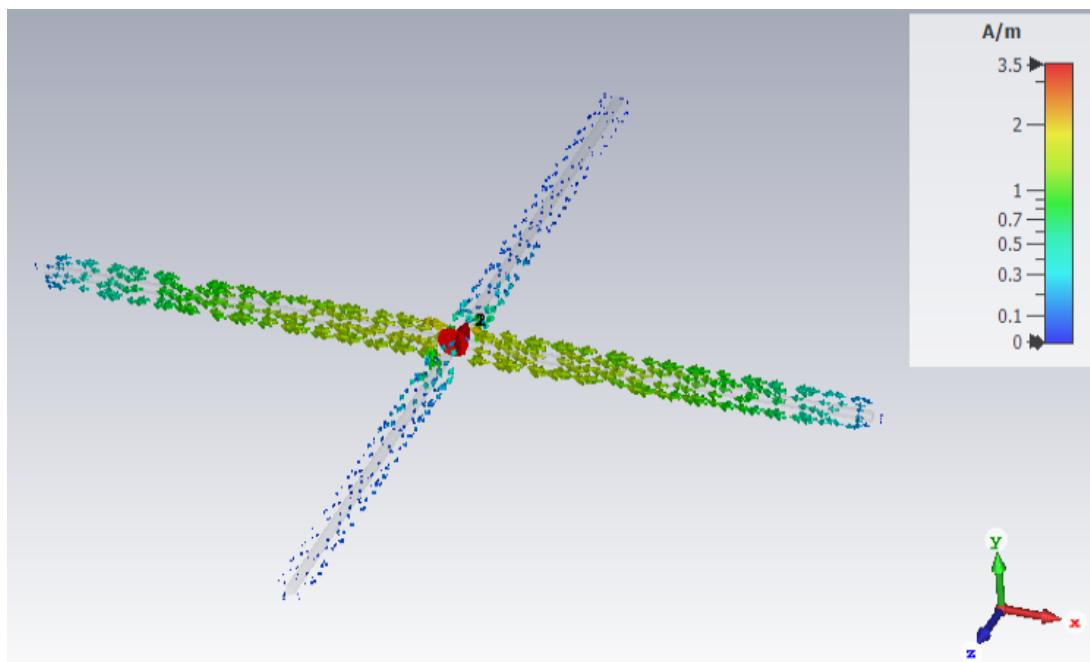
### 5.2.1. Distribución de corrientes en la antena

Como ya se ha explicado, esta antena recoge la polarización circular gracias al desfase que tienen los dos dipolos. Este desfase se puede observar haciendo una simulación de la corriente superficial que existe en los dipolos.

Este desfase se puede lograr conectando los dipolos entre sí mediante un conductor de una longitud  $\lambda_c/4$ , ya que esto provocará un desfase de  $90^\circ$  exactos (Figuras 51 y 52).



**Figura 51:** Corriente superficial de la antena Turnstile con fase = 0



**Figura 52:** Corriente superficial de la antena Turnstile con fase = 90

## 6. Fabricación y medición de las antenas

En esta sección, se va a explicar paso a paso cómo se han construido las dos antenas. Partimos del principio de hacer antenas lo más funcionales posibles pero que también estén comprometidas a un precio justo.

### 6.1. Fabricación de la base de la antena

Las antenas que vamos a construir funcionan de manera distinta según la altura a la que se sitúen con respecto al suelo. Según las simulaciones software la mejor posición es a  $\lambda/2$  del suelo. Es por eso que desde el principio de la construcción se decidió realizar una base para esas condiciones y que además nos permitiera usar distintas antenas usando la misma base.

Para fabricar la base utilizamos una plancha de madera de pino (800x500x28 mm). Como era demasiado grande, se cortó con una sierra por la mitad y así teníamos dos bases en vez de una. Se hizo un agujero de 50 mm con una sierra de corona para posteriormente colocar el tubo de PVC 50 mm que hace de mástil. En el punto más alto del mástil se pega una rosca hembra PVC de 50 mm para poder colocar las antenas. Además decidimos darle una base de pintura blanca a la antena para que quedara más elegante. La base queda al final de esta manera.



**Figura 53:** Base de la antena

## 6.2. Fabricación del dipolo en V

Primero se va a proceder a explicar la fabricación del dipolo en V. Para fabricar la antena se hizo uso de los siguientes materiales:

PRODUCTO	CANTIDAD	PRECIO/UD. (€)
Tubo Rosca Macho PVC	1	1,25
Tubo PVC 25mm 2,5m	1	2,69
Tubo PVC 50mm 2m	1	4,69
T PVC 50mm	1	2,75
Casquillo Reductor 50mm-40mm	2	0,78
Casquillo Reductor 40mm-32mm	2	0,53
Casquillo Reductor 32mm-25mm	2	0,37
Tapón Liso Hembra 25mm	2	0,26
Varillas de aluminio 1m	2	1,79
<b>TOTAL</b>		<b>17,84</b>

**Tabla 6:** Precio de los materiales del dipolo en V

Lo primero que tenemos que construir es la parte funcional de la antena, es decir, la parte que va a conducir la electricidad. Como tenemos que construir un dipolo en V con 120º de apertura tenemos que doblar las varillas metálicas con el decapador.



**Figura 54:** Doblando la varilla con el decapador

El dipolo debe tener una longitud de 109 cm, lo que significa que cada brazo del dipolo tendrá que tener 54.5 cm de longitud. Con una sierra cortamos el sobrante de metal para obtener la longitud de los dos brazos.

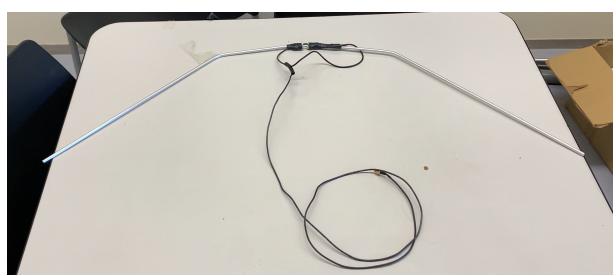


**Figura 55:** Cortando varillas con la sierra

Una vez que tenemos cortados los dos brazos de la antena pasamos a construir el balun de la antena. El balun, como ya vimos en el diseño, tiene el esquema de la Figura 42, que es el que vamos a seguir para la construcción. Cortamos un cable de longitud  $\lambda/4$  para hacer el balun. Para hacer las conexiones usamos el pelacables para hacer un pequeño agujero en los cables y unirlos. Para unir los cables a la antena como en la figura del balun soldamos las conexiones como en la figura del balun. Para realizar las soldaduras nosotros nos ayudamos de cinta americana pues no se quedaba bien soldado.



(a) Soldadura del dipolo en V



(b) Parte funcional del dipolo en V

**Figura 56:** Dipolo en V construido

Una vez que tenemos ya la parte funcional de la antena debemos empezar con la parte de la estructura que va a soportar la antena. Para ello introducimos el dipolo en V dentro de la T de 50 mm y ponemos los casquillos reductores dentro de la T, donde introducimos dos secciones de PVC de 25 mm y los tapones (hay que taladrar un agujero de 6 mm en el tapón e introducirlo por las varillas). En la parte de abajo de la T introducimos una sección de 50 mm de PVC y la pegamos junto a la rosca de 50 mm. De esta manera ya tenemos construida nuestra antena.

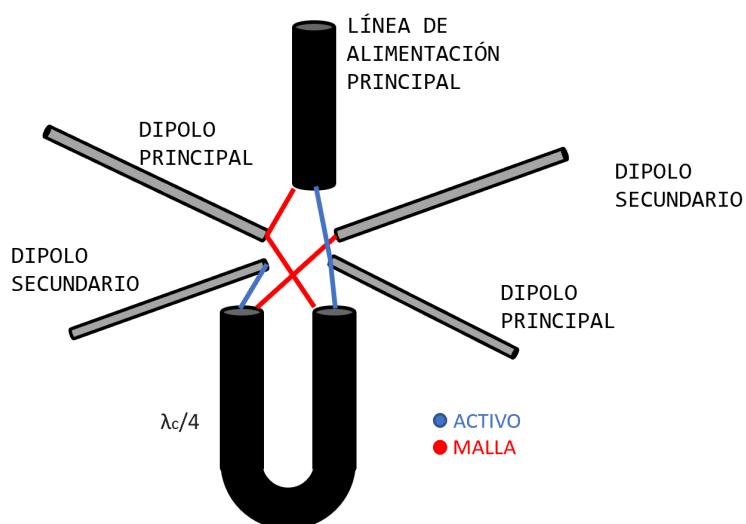
### 6.3. Fabricación de la antena Turnstile

En esta subsección se explica la fabricación de la antena Turnstile. En este caso no necesitamos doblar las varillas de aluminio y las conexiones son muy similares.

PRODUCTO	CANTIDAD	PRECIO/UD (€)
Tubo rosca macho PVC	1	1,25
Tubo PVC 25mm 2,5m	1	2,69
Tubo PVC reductor 50mm-40mm	1	0,78
Tubo PVC reductor 40mm-32mm	1	0,53
Tubo PVC reductor 32mm-25mm	1	0,37
T de 5 vías PVC	1	1,45
Tapón Liso Hembra 25mm	4	0,26
Varilla de aluminio 1m	4	1,79
<b>TOTAL</b>		<b>15,27</b>

**Tabla 7:** Precio de los materiales de la antena Turnstile

Al igual que el dipolo en V, lo primero que tenemos que construir es la parte funcional de la antena, es decir, la parte que va a conducir la electricidad. En este caso el tamaño de los brazos de los dipolos tendrá que ser de 54.5 cm también. Por lo que cortamos las cuatro varillas metálicas con ese tamaño. Una vez que tenemos las varillas tenemos que hacer las conexiones de los cables coaxiales con los brazos de los dipolos de la forma en la que se indica en la Figura 57.



**Figura 57:** Conexiones de la antena Turnstile

Para realizar las conexiones primero cortamos un cable  $\lambda/4$ . Cuando tenemos los dos cables, pelamos con el pelacables los extremos que vayamos a conectar y separamos la malla del activo. Cuando tenemos bien separadas la malla y el activo, podemos soldarlo a las varillas de aluminio tal y como nos mostraba la figura. En nuestro caso, hicimos uso también de la cinta americana para las conexiones



**Figura 58:** Foto de la construcción de la antena Turnstile

Una vez que tenemos montada la parte funcional de la antena, podemos pasar a construir la estructura. Cortamos por la mitad la t de cinco agujeros de 25 mm de manera que quede destapado y podamos introducir dentro los cuatro brazos de los dipolos. Luego volvemos a situar la parte cortada encima y lo unimos con cinta americana. Colocamos algodón dentro de las tuberías para que quede mejor fijada por dentro la antena, y colocamos los tapones de 25 mm (hay que taladrar un agujero de 6 mm en el tapón e introducirlo por las varillas). Ahora unimos los casquillos reductores a la rosca macho de 50 mm e introducimos el quinto agujero en la rosca.

#### 6.4. Imágenes de las antenas construidas

En la Figura 59 se puede observar el dipolo en V que se ha construido montado sobre la base, a una altura de  $\lambda/2$ . La imagen está tomada en el laboratorio de la universidad.



**Figura 59:** Foto final de la antena dipolo en V construida

En la Figura 60 se puede observar la antena Turnstile que se ha construido montado sobre la base, a una altura de  $\lambda/2$ . La imagen está tomada en el césped de mi urbanización.



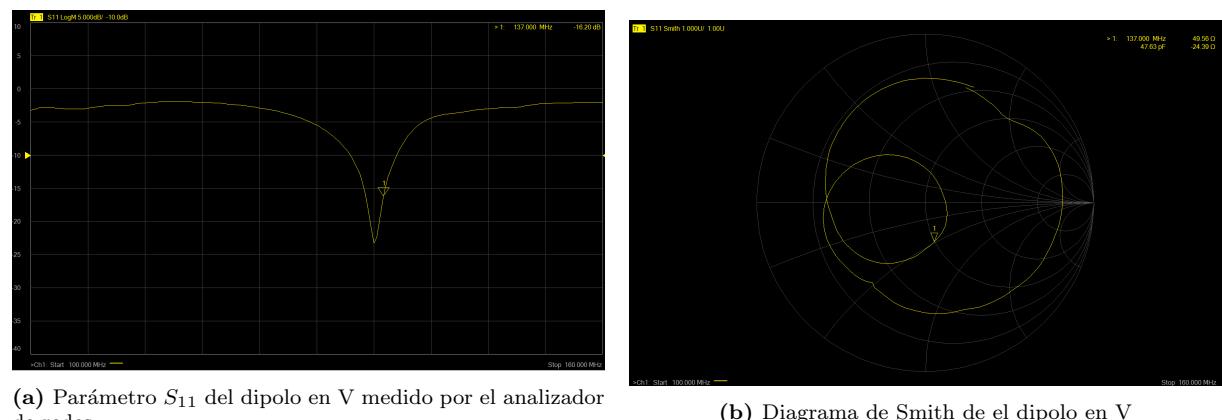
**Figura 60:** Foto final de la antena Turnstile construida

## 6.5. Medición de las antenas

Para verificar el correcto funcionamiento de las antenas que hemos construido, se ha utilizado el analizador de redes vectorial, que nos permite medir el parámetro  $S_{11}$  y la impedancia de las antenas.

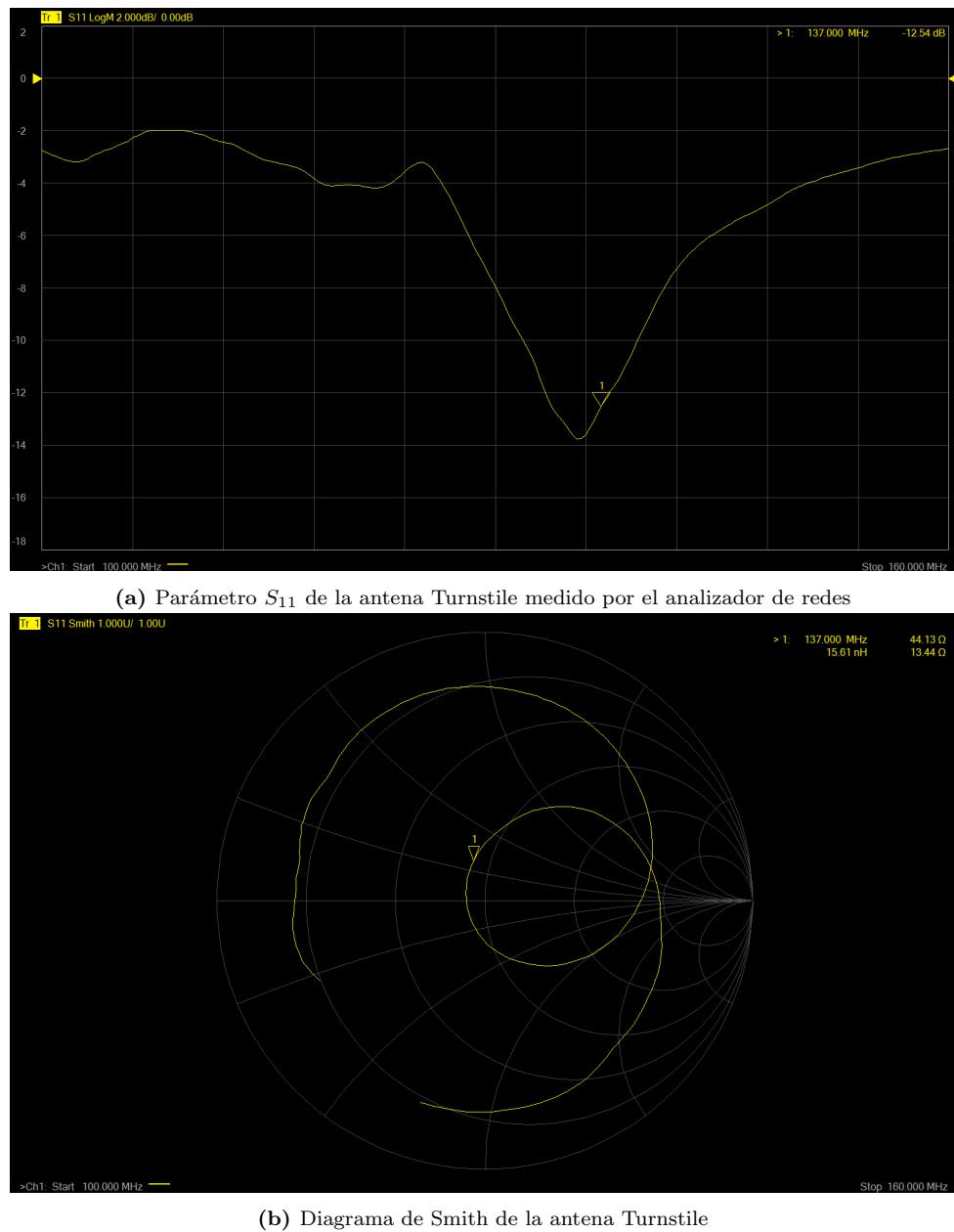
El equipo funciona conectando a uno de los puertos la antena que se desee medir, y se realiza un barrido de frecuencias para ver de qué manera opera. Los resultados obtenidos se representan mediante gráficas con el software de Keysight.

Analizando el dipolo en V observamos que los datos obtenidos coinciden con las simulaciones software y con los parámetros que debíamos obtener. En la Figura 61(a), donde está situado el puntero, se puede apreciar, que a 137 MHz, el dipolo en V cumple que  $S_{11} = -16.20$  dB, y que tiene un ancho de banda aproximado de 130 MHz a 140 MHz. Observando la Figura 61(b), donde se presenta el diagrama de Smith del dipolo en V, apreciamos que el dipolo cumple con una impedancia cercana a los 50 ohmios.



**Figura 61:** Mediciones del dipolo en V con el analizador de redes

Analizando la antena Turnstile observamos que los datos obtenidos coinciden con las simulaciones software y con los parámetros que debíamos obtener. En la Figura 62(a), donde está situado el puntero, se puede apreciar, que a 137 MHz, la antena cumple que  $S_{11} = -12.54$  dB, y que tiene un ancho de banda aproximado también de 130 MHz a 140 MHz. Observando la Figura 62(b), donde se presenta el diagrama de Smith de la antena Turnstile, se puede comprobar que también se cumple con los 50 ohmios de impedancia.



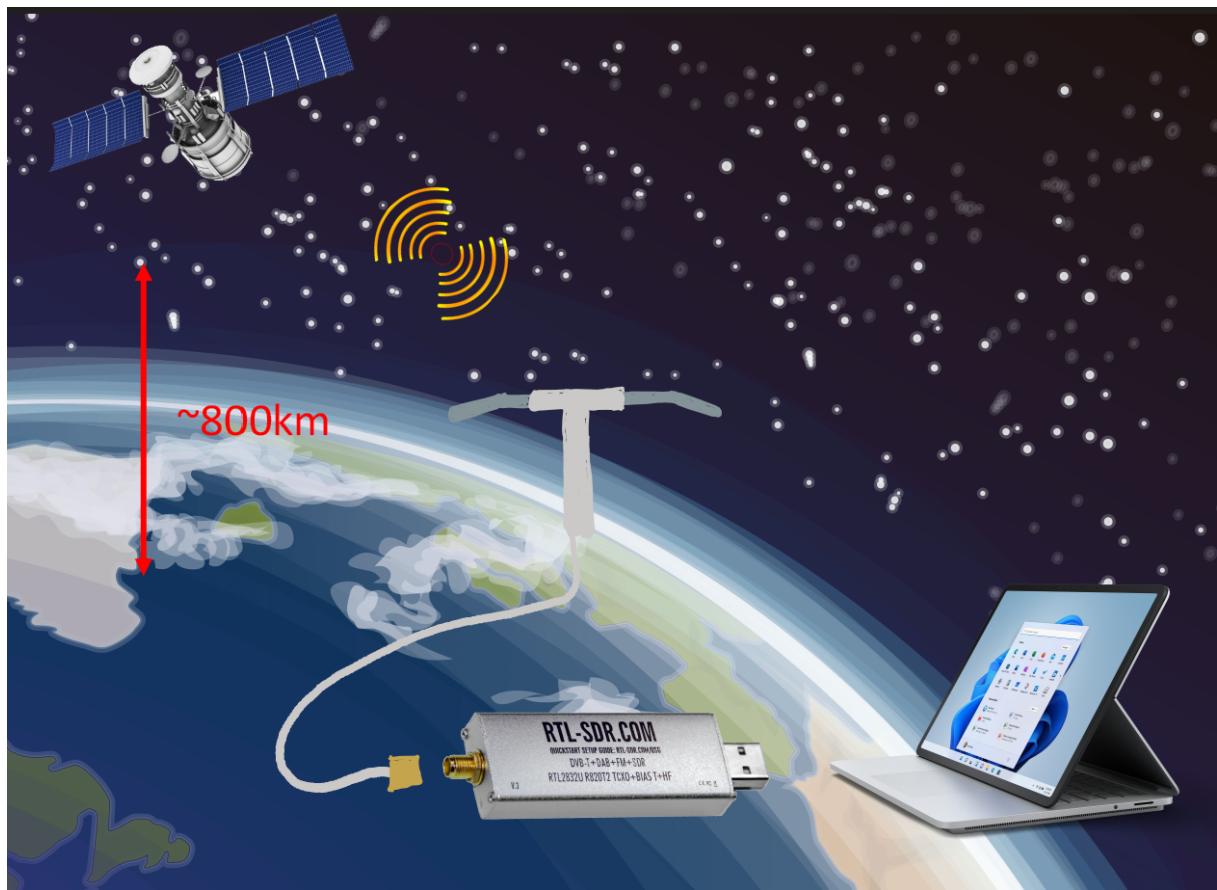
**Figura 62:** Mediciones de la antena Turnstile con el analizador de redes

## 7. Recepción de la señal satélite y análisis de resultados

Esta sección describe todo el proceso de recepción de la señal una vez tenemos construidas nuestras antenas y sabemos que son operacionales. Además se realizará un análisis de los resultados obtenidos para conseguir una comprensión más profunda de los datos recibidos.

### 7.1. Esquema de la recepción satélite tras el diseño

Ahora podemos concretar el esquema de recepción que se había visto al inicio del trabajo con nuestro satélite, nuestras antenas y el SDR.



**Figura 63:** Esquema de recepción

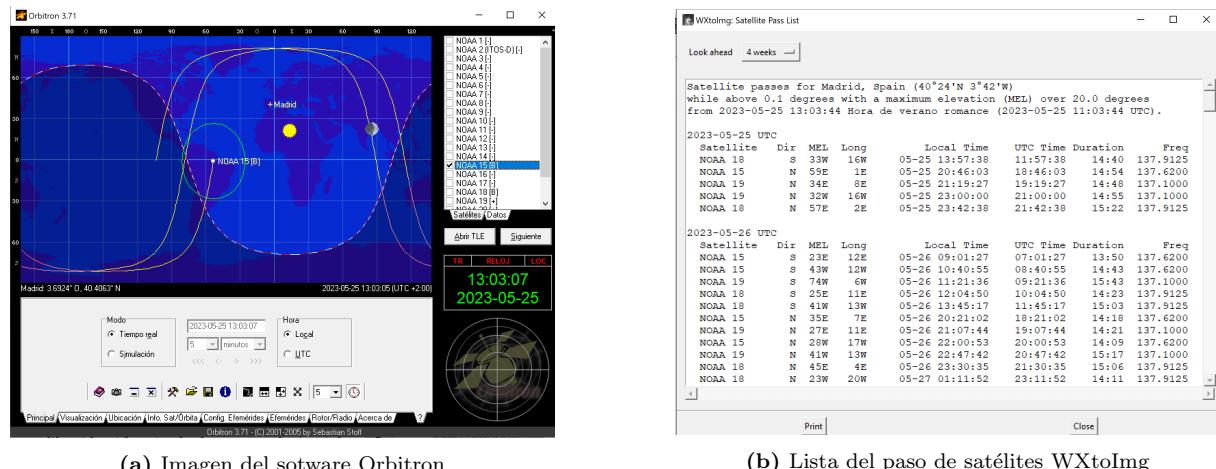
Como se puede apreciar en la Figura 63, el satélite se encuentra a 800 km de altura, y pasará por encima de nuestras cabezas durante un tiempo medio de 10 minutos. Cuando estemos dentro de su cobertura electromagnética la antena comenzará a excitarse, y

recogeremos la señal mediante nuestro cable coaxial hasta nuestro SDR. En el SDR se filtrará la señal gracias al software SDR#, seleccionando la frecuencia de transmisión del satélite y su ancho de banda. El audio que recoja el SDR# será simultáneamente dirigido al software WXtoImg, que demodulará y decodificará la señal era irá dibujando la imagen en el display del software.

## 7.2. Ejemplo de recepción de la señal satélite

Si queremos recibir el satélite deberemos seguir los siguientes pasos.

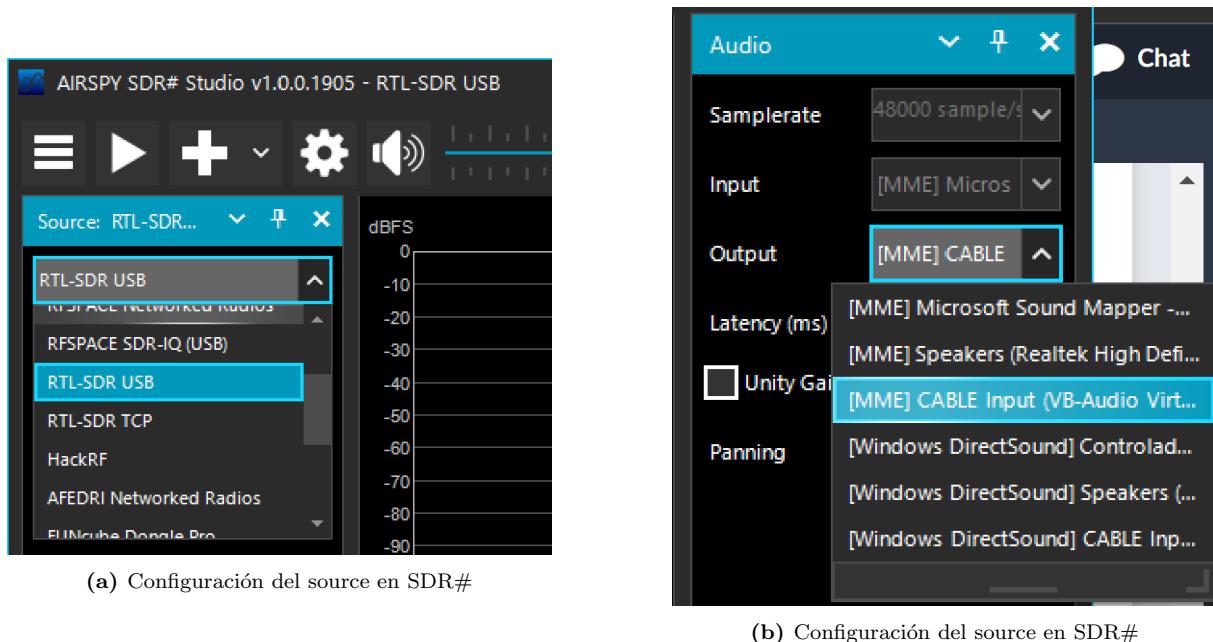
Debemos saber la hora a la que pasa nuestro satélite por encima de nosotros (el NOAA15, NOAA18 o NOAA19). Para esta tarea podemos utilizar dos softwares. Orbitron nos permite ver por donde va a pasar el satélite de manera gráfica, incluso mostrándonos la cobertura electromagnética. WXtoImg nos ofrece los pasos de los satélites en una lista, en la que podemos ver la hora local a la que pasa y la duración del paso. Ambos software requieren configuración previa, ver el anexo para más información.



**Figura 64:** Software para la localización de los satélites

Cuando ya sabemos a la hora que pasa nuestro satélite, situamos nuestra antena en un lugar despejado de edificios y vegetación, si es posible. A más altura y menos obstáculos, mejor será nuestra SNR en la señal. Encendemos nuestro ordenador y conectamos el SDR al ordenador y el cable coaxial de la antena al SDR.

En el ordenador abrimos el SDR# y el WXtoImg. Nos aseguramos que el source en el SDR# sea el SDR que estemos utilizando, en nuestro caso el RTL-SDR USB, y nos aseguramos que el output de audio del SDR# sea el input de WXtoImg mediante el cable virtual. En el WXtoImg le damos a autorecord para que se quede a la espera de la señal satélite.

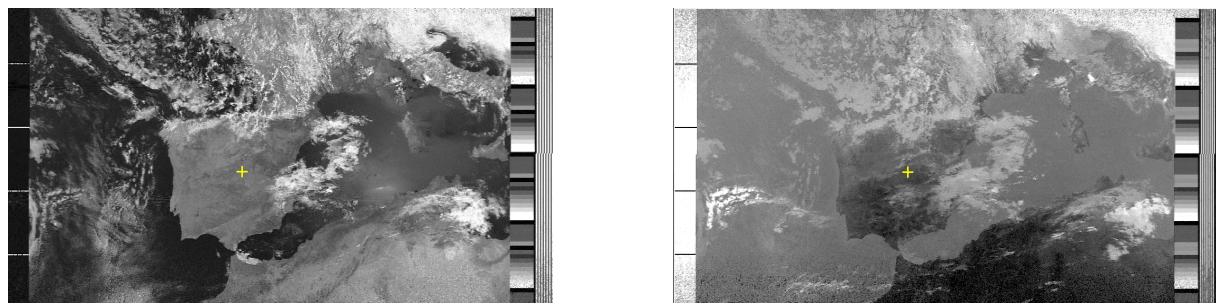


**Figura 65:** Configuración del software SDR#

Ahora centramos la señal en la frecuencia deseada, esperamos a que aparezca la señal del satélite lentamente, y comprobamos que se va dibujando la imagen en el WXtoImg cuando empezamos a recibir los pitidos del audio. Cuando termine de pasar el satélite, perderemos la señal y el WXtoImg generará la imagen procesada automáticamente. El satélite manda dos imágenes. Una por el canal A, que es el canal visible, y otra por el canal B, que es el canal infrarrojo. Con estas dos imágenes podemos pasar a analizar los datos que hemos recogido.

### 7.3. Análisis de resultados

Una vez que hemos recibido la señal del satélite y tenemos la imagen procesada en el WXtoImg, se procede a explicar la interpretación de los distintos datos que nos ha enviado el NOAA.

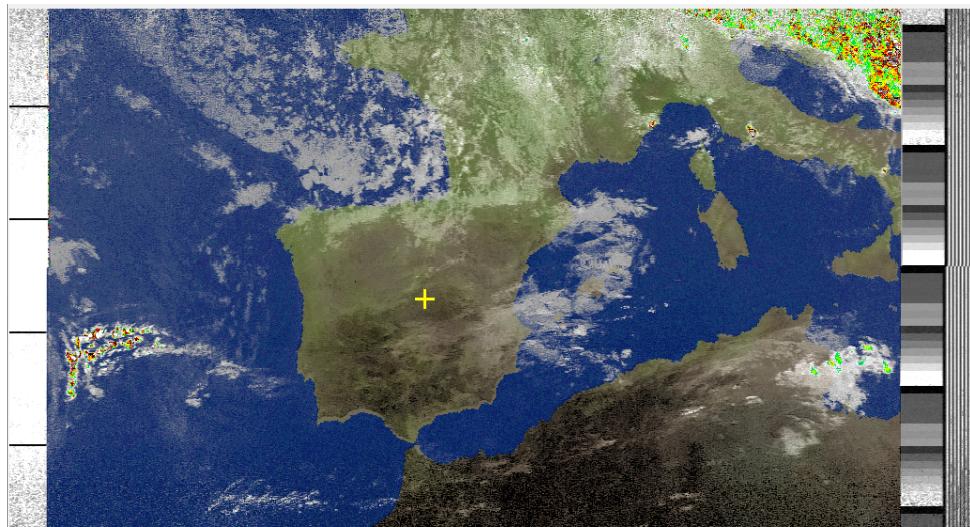


**Figura 66:** Imágenes transmitidas por el satélite NOAA

Para ello, el software WXtoImg procesa las imágenes y las presenta en la sección de enhancements. Vamos a explicar los enhancements más significativos.

### 7.3.1. MCIR con precipitaciones

Es una imagen del canal de Infrarrojo de Media Cobertura (MCIR, por sus siglas en inglés) que muestra la presencia de precipitación o lluvia.

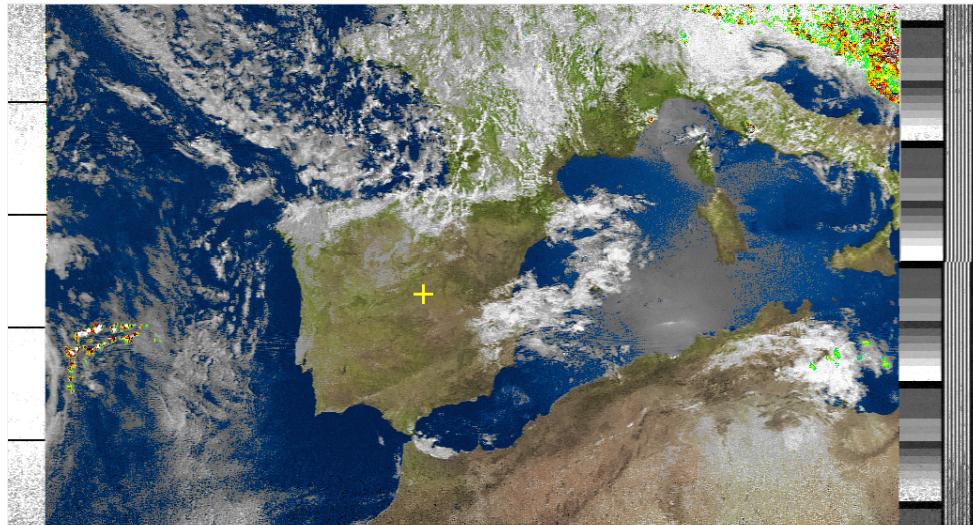


**Figura 67:** Imagen MCIR con precipitaciones

### 7.3.2. MSA con precipitaciones

”MSA” significa ”Multispectral Analysis” (Análisis Multiespectral). Es una técnica utilizada para analizar imágenes satelitales que capturan datos en múltiples bandas espectrales. Cada bandapectral proporciona datos sobre características específicas de la Tierra, como vegetación, agua, nubes, temperatura superficial, entre otros. El MSA se basa en la

combinación y análisis de estas diferentes bandas para obtener información más completa sobre la superficie terrestre.



**Figura 68:** Imagen MSA con precipitaciones

### 7.3.3. HVCT con precipitaciones

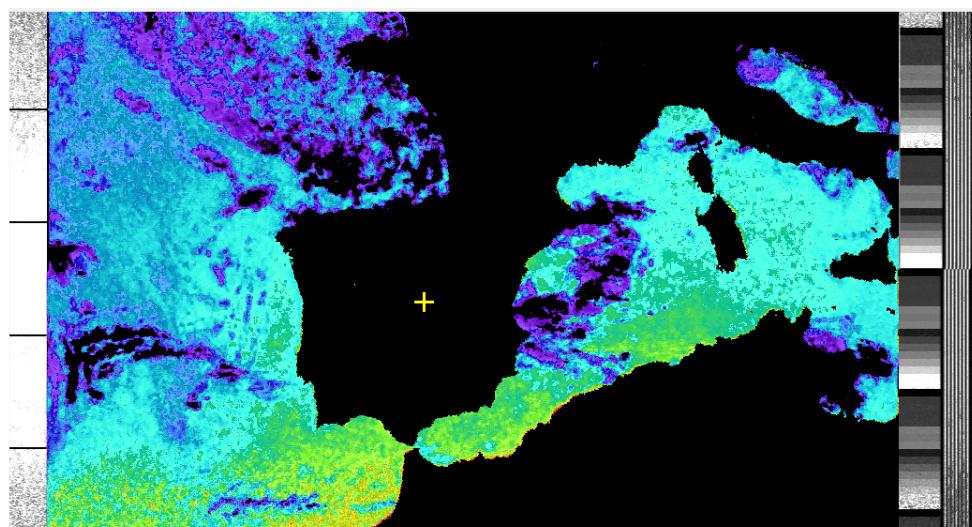
”HVCT” significa ”High Vegetation and Customized Transformation”(Alta Vegetación y Transformación Personalizada). En esta técnica, se aplican transformaciones personalizadas a las bandas espectrales de una imagen satelital para resaltar y visualizar características específicas, como la vegetación, en forma de colores falsos.



**Figura 69:** Imagen HVCT con precipitaciones

#### 7.3.4. Temperatura de la superficie del mar

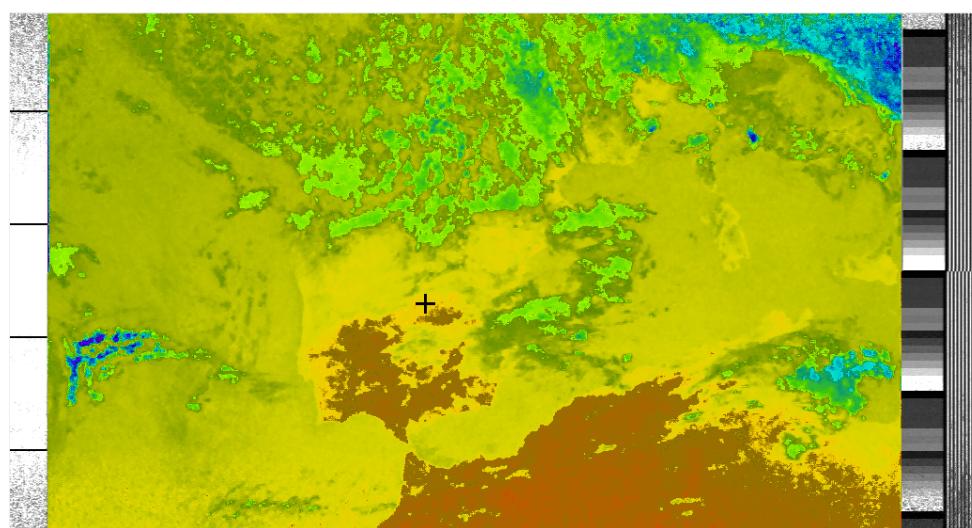
Como su nombre bien indica recibimos datos sobre la temperatura de la superficie del mar. En este caso el Mediterráneo y las costas están notablemente más calientes que el océano Atlántico. Los puntos más fríos del Mediterráneo son nubes.



**Figura 70:** Imagen de la temperatura de la superficie del mar

#### 7.3.5. Térmica

En este enhancement podemos ver las temperaturas de la superficie terrestre. Se aprecia que África tiene una temperatura mayor a Europa.



**Figura 71:** Imagen de la temperatura de la superficie terrestre

## 8. Conclusión y líneas futuras

### 8.1. Conclusiones

En este trabajo de final de grado, se ha presentado todo el proceso de recepción de una señal de un satélite meteorológico. Se ha comprendido cómo se debe diseñar una antena para que la recepción sea óptima, mediante la simulación software en la herramienta electromagnética comercial CST Studio, y posteriormente con la recepción real de la señal con una antena construida con materiales accesibles. Además se ha confirmado su correcto funcionamiento con el analizador vectorial de redes, asegurándonos que el parámetro  $S_{11}$  era el deseado.

El uso de tecnologías como el software SDR# y el SDR ha permitido la decodificación exitosa de las imágenes transmitidas por los satélites meteorológicos NOAA. Esto ha posibilitado el estudio y análisis de nuestro planeta desde una perspectiva meteorológica, contribuyendo a la comprensión de los fenómenos climáticos y sus implicaciones. Además, se ha brindado una visión general de los distintos tipos de satélites meteorológicos y las agencias encargadas de su operación, destacando la importancia de su labor en la obtención de datos cruciales para la predicción del clima.

Se ha comprobado cómo los satélites meteorológicos envían sus señales para desempeñar un papel fundamental en la obtención de datos e imágenes para la monitorización y pronóstico del clima, lo que provoca un desarrollo en la sociedad al poder predecir cómo se va a comportar nuestro planeta.

## 8.2. Líneas futuras

El presente Trabajo de Fin de Grado podría extenderse de las siguientes maneras:

El siguiente paso lógico en este trabajo sería realizar las otras dos antenas que se explican en el documento, la double crossed antenna y la antena cuadrifilar. Se espera que este trabajo sirva como punto de partida para investigaciones posteriores sobre la optimización de las antenas que se han construido y las relacionadas.

La tecnología SDR es otro campo de estudio. En este proyecto se ha utilizado el RTL SDR. Comparar las distintas tecnologías de radio definida por software para optimizar la recepción de las señales es uno de los puntos de mejora que se pueden aplicar.

Este estudio puede continuarse también con la recepción de satélites que se encuentren en órbitas geoestacionarias, que requerirán de un diseño de antenas diferente, ya que estas antenas deberían ser diseñadas para tener una alta directividad. En este documento aparece una primera aproximación de cómo deberían ser las antenas receptoras y los satélites que se pueden recibir.

En cuanto a la campaña de visibilidad de la Ingeniería de Telecomunicación, se espera que continúe promoviendo el conocimiento y la conciencia sobre el papel crucial de esta disciplina en el campo de las comunicaciones satelitales y la observación meteorológica. Se espera que futuros proyectos de investigación y divulgación amplíen el alcance y el impacto de estas iniciativas, generando un mayor interés y participación en el campo de las telecomunicaciones.

### 8.3. Visibilidad de Ingeniería de Telecomunicaciones

Durante mi trayecto en el grado y realizando este TFG siempre he intentado comunicar que la Ingeniería de Telecomunicaciones es un grado precioso, que nos permite comprender algo tan mágico como puede ser que tú estes leyendo esto porque se ha enviado y creado a través de infraestructuras de telecomunicaciones.

#### 8.3.1. Video del trabajo final de grado

Es por eso que para completar mi trabajo final de grado, y en su defecto, el grado de Telecomunicaciones, he realizado un vídeo explicando de manera básica cuál ha sido el proceso de mi TFG para que cualquier persona pueda interesarse por este grado.

[https://www.youtube.com/watch?v=G\\_gZaqCSSUs](https://www.youtube.com/watch?v=G_gZaqCSSUs)



Figura 72: Vídeo de youtube

#### 8.3.2. Visibilidad en la universidad

Las antenas construidas serán puestas en aulas de mi universidad para que los futuros alumnos puedan usarlas, ya sea en alguna práctica de radiocomunicaciones o en jornadas de puertas abiertas.

### 8.3.3. Visibilidad en redes sociales

Además también he intentado promocionarlo mediante LinkedIn en las redes sociales.

[https://www.linkedin.com/posts/enrique-robles-uriel-4068b6224\\_c%C3%B3mo-puedes-recibir-im%C3%A1genes-desde-el-espacio-activity-7067069676006088704-h4PN?utm\\_source=share&utm\\_medium=member\\_desktop](https://www.linkedin.com/posts/enrique-robles-uriel-4068b6224_c%C3%B3mo-puedes-recibir-im%C3%A1genes-desde-el-espacio-activity-7067069676006088704-h4PN?utm_source=share&utm_medium=member_desktop)



**Figura 73:** Publicación de LinkedIn

## Referencias

- [1] Información sobre las órbitas polares. <https://sky-lights.org/2010/05/01/qa-polar-satellites-2/>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [2] Información sobre las órbitas geosíncronas y geoestacionarias. <https://axessnet.com/que-son-y-para-que-sirven-los-satelites-geoestacionarios/>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [3] Información sobre los satélites GOES del NOAA. <https://www.goes.noaa.gov/>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [4] Información de el NOAA. <https://www.noaa.gov/>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [5] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley, Hoboken, NJ, 2005.
- [6] Antonio Alex Amor. *Elementos radiantes para aplicaciones en redes de sensores IoT*. UGR, 2016.
- [7] Información sobre la polarización. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/polclas.html>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [8] Información de las distintas agencias y satélites meteorológicos. <https://space.oscar.wmo.int/spaceagencies>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [9] 3ds.com, CST Studio Software. <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/cst-studio-suite/>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [10] RTL SDR. <https://www rtl-sdr.com/>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [11] Página oficial para la descarga del SDR#. <https://airspy.com/download/>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [12] Página web de descarga de WXtoImg. <https://wxtoimgrestored.xyz/>. Accedido el 4 de junio de 2023.

- [13] Página web de descarga de Orbitron. <http://www.stoff.pl/>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [14] datasheet del Keysight M9370A. <https://www.keysight.com/us/en/assets/9018-03636/technical-specifications/9018-03636.pdf>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [15] Página web de información de satélites meteorológicos. <https://es.allmetsat.com/satelites-meteorologicos.php>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [16] EUMETSAT. <https://www.eumetsat.int/about-us/who-we-are>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [17] Información sobre las antenas para recibir con un sdr de los satélites NOAA. <https://www rtl-sdr.com/rtl-sdr-tutorial-receiving-noaa-weather-satellite-images/>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [18] Información sobre la antena QHF. <http://jcoppens.com/ant/qfh/index.en.php>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [19] Descripción del funcionamiento de una antena Turnstile. <https://www.everythingrf.com/community/what-is-a-turnstile-antenna>. Accedido el 4 de junio de 2023.
- [20] Información sobre la Double Cross Antenna. <https://www.qsl.net/py4zbz/DCA.pdf>. Accedido el 4 de junio de 2023.