



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Desarrollo e instalación de una
carga de pago de guerra electrónica
basada en radio definida por
software sobre vehículos aéreos no
tripulados para realizar medidas de
apoyo electrónico.

Autor

Jorge Astorga Ybarra

Director/ es

Director académico: Daniel Casanova Ortega

Director militar: Félix Asensio Chácharo

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2022



AGRADECIMIENTOS

Tras 4 años de grandes esfuerzos, este trabajo final de grado conlleva la finalización de mis estudios de Ingeniería de Organización Industrial en el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza. Gran parte de todo lo que he conseguido hasta ahora se lo debo a mi madre, Juana Ibarra Celestino, quien se preocupó en que recibiera la mejor formación y que me enseñó a ser la persona que soy hoy en día. A mi tía, María Astorga Barea, por inculcarme desde pequeño la importancia de los idiomas para comunicarnos, aprender y transmitir conocimientos. Mi colegio e instituto de Madrid, el colegio Valdeluz, donde tuve unos excelentes profesores que me proporcionaron una base sólida de conocimientos sobre la que construir, y que me preparó para mi etapa universitaria, y donde conocí a los mejores amigos que uno puede tener. A Sergio Fernández Contreras, por prestarme toda la ayuda que te he pedido sin esperar nada a cambio. A mi novia, Elena Pérez Ruiz, que me ha acompañado y dado ánimos en esta aventura desde el principio.

Quisiera agradecer también a todo el personal del Regimiento de Guerra Electrónica Nº31, y en concreto al personal del centro de control de apoyo logístico, toda la dedicación que han tenido conmigo. Al Cabo Mayor D. José Antonio Moreno Chirveches, por enseñarme tantísimas cosas y por aguantarme durante muchos días de mis prácticas externas. Al Comandante D. Jesús Ignacio Rodríguez Olmedo, por darme la oportunidad de poder acompañarles a realizar unas pruebas del Proyecto CERVUS junto con los ingenieros de la empresa Gradient, en el municipio de Pedro Muñoz.

Por último, agradecer a D. Daniel Casanova Ortega, mi tutor académico, y al Capitán D. Félix Asensio Chácharo, por guiarme y orientarme durante todo el proceso.

A todos vosotros os dedico este trabajo, y os agradezco una vez más todo el apoyo depositado en mí.



RESUMEN

Hoy en día, en el ámbito militar, y más concretamente en el ámbito de la guerra electrónica, la posibilidad de realizar medidas de apoyo electrónico con el fin de buscar, interceptar e identificar las emisiones electromagnéticas y localizar su origen, supone una pieza clave a la hora de recabar información que pudiera ser de utilidad para el mando y control de las operaciones militares, además de proporcionar información técnica para futuras maniobras.

El creciente aumento del uso de drones en nuestra sociedad nos hace pensar en la gran cantidad de posibilidades que nos permiten este tipo de aeronaves por las características que ofrecen. Esto, sumado a la tendencia de reducir el tamaño de los dispositivos electrónicos, supone el origen y el objetivo del trabajo: conseguir desarrollar un sistema que permita realizar medidas de apoyo electrónico sobre drones, y que al mismo tiempo sea capaz de realizar operaciones militares en profundidad sin ser detectado por el enemigo.

Uno de los problemas que nos encontramos principalmente es dimensionar la carga que porta el dron, y que se encarga de realizar las funciones no relacionadas con el vuelo. A estas cargas se las suele denominar carga de pago o carga útil. Dado que el dron utilizado en el proyecto no puede soportar un gran peso, la carga de pago estará basada en radio definidas por *software*, ya que ofrecen una gran diversidad de opciones a un precio muy económico, con un tamaño y peso adecuados al dron empleado. Aunque por un lado las radios definidas por *software* presentan una gran versatilidad al sustituir los diferentes componentes físicos de una radio tradicional por líneas de código, sus capacidades disminuyen, por tanto, se deberá considerar que el rendimiento ofrecido por el sistema es el adecuado.

En el cuerpo del trabajo se expone todo el procedimiento seguido para integrar el *hardware* con el *software*. También se da a conocer de una forma muy general los componentes y las ventajas que ofrecen. Cabe destacar que todo el *software* escogido es libre y de código abierto, por lo que cualquier persona puede tener acceso a él. Además, se realizan dos pruebas para verificar que el sistema desarrollado funciona correctamente y demostrar su operatividad, teniendo en cuenta que sería un operador quien se encargaría de explotar dicho sistema para exprimir al máximo sus capacidades.

En las conclusiones se extrae si el sistema desarrollado cumple con sus funciones adecuadamente y si verdaderamente supondría una ventaja táctica a las unidades de guerra electrónica del ejército de tierra español. En las líneas futuras se propone una visión subjetiva de como estas tecnologías pueden llegar a suponer un cambio importante en la forma de llevar a cabo la guerra electrónica, así como una mejora en la adquisición de material del ejército para poder dotar a las unidades de material tecnológicamente avanzado, además de la tendencia de desarrollo en el medio y largo plazo.

PALABRAS CLAVE

Guerra electrónica, carga de pago y radio definida por *software*.



ABSTRACT

Today, in the military field, and more specifically in the field of electronic warfare, the possibility of carrying out electronic support measures in order to seek, intercept and identify electromagnetic emissions and locate their origin, is a key player in gathering information that could be used for the command and control of military operations, as well as providing technical information for future maneuvers.

The growing use of drones in our society makes us think about the many possibilities that these types of aircraft allow us for the features they offer. This, together with the tendency to reduce the size of electronic devices, supposes the origin and the objective of the work: to achieve the development of a system that allows to carry out measure of electronic support on drones, and at the same time capable of conducting in-depth military operations without been detected by the enemy.

One of the main problems we encounter is sizing the cargo carried by the drone, which is responsible for performing functions unrelated to the flight. These charges are often referred to as payloads. Since the drone used in the project cannot withstand much weight, the payload will be based on software defined radio, as they offer great versatility at a very economical price, with a size and weight appropriate to the drone used. While on the one hand software-defined radios offer great versatility by replacing the different physical components of a traditional radio with lines of code, their capabilities diminish, therefore, the performance offered by the system is appropriate.

In the body of the work is exposed all the procedure followed to integrate the hardware with the software. The components and advantages they offer are also made known in a very general way. It should be noted that all the software chosen is free and open source, so that anyone can have access to it. In addition, two tests are performed to verify that the developed system is working properly.

The conclusions are whether the developed system fulfils its functions properly and whether it would truly be a tactical advantage to the electronic warfare units of the Spanish army. In the future lines, a subjective view is proposed of how these technologies can lead to a significant change in the way in which military equipment is acquired, as well as the development trend in the medium and long term.

KEYWORDS

Electronic warfare, payload and software defined radio.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
PALABRAS CLAVE	II
ABSTRACT	III
KEYWORDS	III
ÍNDICE DE CONTENIDOS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS	X
1. INTRODUCCIÓN	X
1.1. Antecedentes	1
1.2. Motivación	1
1.3. Objetivos	2
1.4. Alcance	2
1.5 Metodología	2
2. CONCEPTOS PREVIOS Y ESTADO DEL ARTE	4
2.1. Telecomunicaciones	4
2.2. Guerra electrónica y medidas de apoyo electrónico	7
2.3. Radio definida por <i>software</i>	8
2.4. Vehículos aéreos no tripulados	11
3. INTEGRACIÓN DE LA CARGA DE PAGO DE GUERRA ELECTRÓNICA SOBRE VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO	14
3.1. <i>Hardware</i>	14
3.1.1. Radio definida por <i>software</i> : RTL-SDR V3	15
3.1.2. Ordenador: Raspberry Pi 3 Model B+	17
3.1.3. Dron: Yuneec Typhoon H plus	18
3.1.4. Impresora 3D: Artillery Sidewinder X1	19
3.1.5. Material de impresión: ácido poliláctico	19
3.1.6. Soporte de la carga de pago	22
3.1.7. Antena WiFi : Aqprox APPUSB26AC	22
3.1.8. Receptor GPS con salida USB: VK-162 GMOUSE	23
3.1.9. Batería externa: POWERADD Pilot X7	23
3.2. <i>Software</i>	23
3.2.1 Sistema operativo: Ubuntu	23
3.2.2. <i>Software</i> propio de radio definida por <i>software</i>	24
3.2.3. <i>Software</i> de escritorio remoto: VNC Viewer	25
3.2.4. <i>Software</i> de diseño asistido por computadora: Autodesk Inventor	25
3.2.5. <i>Software</i> de impresión 3D: Cura	26
3.3 Sistema completo y funcionamiento	27
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS DE ACCIONES DE VIGILANCIA ELECTRÓNICA MEDIANTE RADIO DEFINIDA POR <i>SOFTWARE</i> SOBRE VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO	34
4.1 Mapa de calor de señales electromagnéticas	34
4.2 Variación de la potencia en recepción de señales analógicas en función de la altura	35



5. CONCLUSIONES	37
Líneas futuras	37
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
ANEXOS	45
Anexo I. The radio spectrum	46
Anexo II. GNU Radio y ejemplo de diagramas de bloques para un transmisor y receptor SSB	48
Anexo III. Proyecto Tactica en atlanTTic	50
Anexo IV. webSDR	51
Anexo V. Especificaciones técnicas Yuneec Typhoon H Plus	52
Anexo VI. Clasificaciones de drones	53
Anexo VII. Diseño mecánico de la Raspberry Pi 3 Model B+	54
Anexo VIII. Especificaciones técnicas Raspberry Pi 3 Model B+	55
Anexo IX. Especificaciones técnicas RTL2832U V3	56
Anexo X. Documentación del soporte de la carga de pago	57
Anexo XI. Ficha técnica APPUSB26A	63
Anexo XII. Ficha técnica VK-162 GMOUSE	64
Anexo XIII. Ficha técnica POWERADD Pilot X7	65
Anexo XIV. <i>Software</i> propio de SDR empleado en el trabajo	66
Anexo XV. Especificaciones técnicas de los transmisores	68
Anexo XVI. Parámetros introducidos en Radio Mobile	71
Anexo XVII. Tabla con resultados experimentales y simulaciones obtenidas en Radio Mobile	73
Online	73
Anexo XVIII. Gráficas sobre la variación de potencia con la altura del UAV obtenidas y script utilizado con MATLAB	76



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Parámetros de una onda	4
Figura 2: Modelo básico de un sistema de comunicaciones	5
Figura 3: Representación temporal y frecuencial de una señal	5
Figura 4: Modulaciones AM, PM y PM	6
Figura 5: Entorno táctico de la EW	7
Figura 6: Línea del tiempo con los principales hitos en telecomunicaciones	9
Figura 7: Esquema general de la arquitectura de una SDR	9
Figura 8: Escudo de armas de la UEW II/31	10
Figura 9: SDR Hack RF One (izquierda) y SDR Aircrack-ng (derecha)	10
Figura 10: Dron DJI Matrice 600 Pro	13
Figura 11: Dron junto con la carga de pago de EW	14
Figura 12: RTL-SDR V3	14
Figura 13: Kit antena dipolo	15
Figura 14: Microprocesador Qualcomm Snapdragon 888 5G	16
Figura 15: Raspberry Pi 3 Model B+	17
Figura 16: Carcasa protectora Joy-It junto con la Raspberry Pi 3 Model B+	17
Figura 17: Yuneec Typhoon H plus	18
Figura 18: Artillery Sidewinder X1	18
Figura 19: Rollos de hilos de PLA	19
Figura 20: Página web de Thingiverse	19
Figura 21: Caja de la carga de pago	20
Figura 22: Gimbal de cámara en Thingiverse	20
Figura 23: Tapa de la zona de almacenamiento de la batería externa.	20
Figura 24: Tapa de la zona de almacenamiento de la Raspberry Pi 3 Model B+	21
Figura 25: Soporte de agarre de la carga de pago	21
Figura 26: Conjunto del soporte de la carga de pago	21
Figura 27: Dual Band High Power Wireless USB External Adapter	22
Figura 28: Receptor GPS con salida USB: VK-162 GMouse	22
Figura 29: Batería externa POWERADD Pilot X7	23
Figura 30: Esquema que muestra la interacción entre el SO y las distintas partes que conforman el sistema informático	23
Figura 31: GNU + Linux	24
Figura 32: Esquema de funcionamiento del protocolo RFB	25
Figura 33: Captura de pantalla de VNC Viewer en la que se puede observar los parámetros de conexión con la carga de pago	25
Figura 34: Captura de pantalla de Autodesk Inventor con la pieza de la carcasa principal de la carga de pago	26
Figura 35: Captura de pantalla de Cura con el archivo STL de la carcasa principal de la carga de pago	26
Figura 36: Esquema del sistema de comunicación de la carga de pago	27



Figura 37: Configuración de la SSID y banda de trabajo del PA en la interfaz gráfica de Ubuntu	28
Figura 38: Configuración de la contraseña del PA en la interfaz gráfica de Ubuntu	28
Figura 39: Configuración de las direcciones IP asignadas por el PA en la interfaz gráfica de Ubuntu	28
Figura 40: Configuración para activar el PA automáticamente con el arrancado en la interfaz gráfica de Ubuntu	28
Figura 41: Captura de pantalla de la configuración manual de la dirección IP del adaptador de LAN inalámbrica Wifi en el PC (Windows 10)	29
Figura 42: Comprobación de la conexión WiFi mediante el comando "ping -t"	29
Figura 43: Acceso a la consola de comandos de la carga de pago mediante SSH y activación de permisos de superusuario	30
Figura 44: Activación de puerto de la aplicación VNC Viewer mediante el comando "vncserver"	30
Figura 45: Aviso de conexión no cifrada en VNC Viewer	31
Figura 46: Escritorio remoto de VNC Viewer	31
Figura 47: Comandos utilizados para abrir el programa RTLSDR Scanner en VNC Viewer	32
Figura 48: Ventana del programa RTLSDR Scanner en VNC Viewer	32
Figura 49: Conexión TCP con la SDR	33
Figura 50: Configuración de los parámetros de la fuente en SDR Sharp para utilizar la SDR por conexión TCP	33
Figura 51: Mapa de calor para dos transmisores analógicos a 439 MHz	34
Figura 52: Transmisor digital tipo DMR Motorola DP4400 (Derecha) y analógico Baofeng UV-5E (Izquierda)	35
Figura 53: Logotipo de GNU Radio	48
Figura 54: Pantalla principal del entorno GNU Radio	48
Figura 55: Diagrama de bloques en GNU Radio para un transmisor SSB	49
Figura 56: Diagrama de bloques en GNU Radio para un receptor SSB	49
Figura 57: Diagrama de bloques del sistema de comunicaciones satélite creado en el proyecto Tactica	50
Figura 58: Página principal de la WebSDR con las estaciones receptoras de Europa	51
Figura 59: Localización de las estaciones receptoras de la WebSDR en la península ibérica	51
Figura 60: Especificaciones técnicas del dron Yuneec Typhoon H plus	52
Figura 61: Tipología de drones atendiendo a su arquitectura	53
Figura 62: Clasificación de los RPAS de clase I según OTAN	53
Figura 63: Diseño mecánico de la Raspberry Pi 3 Model B+	54
Figura 64: Ficha técnica de la Raspberry Pi 3 Model B+	55
Figura 65: Cartel ilustrativo de los componentes de la RTL2832U V3	56
Figura 66: Plano explosionado del soporte de la carga de pago	57
Figura 67: Plano 1 de la carcasa principal	58
Figura 68: Plano 2 de la carcasa principal	59
Figura 69: Plano de pieza del soporte de agarre	60
Figura 70: Plano de pieza de la tapa 1	61
Figura 71: Plano de pieza de la tapa 2	62
Figura 72: Ficha técnica APPUSB26AC	63
Figura 73: Especificaciones técnicas del receptor GPS con salida USB VK-161 GMOUSE	64



Figura 74: Especificaciones técnicas de la batería externa POWERADD Pilot X7	65
Figura 75: Captura de pantalla del programa SDR Sharp sin plugins	66
Figura 76: Captura de pantalla del programa SDR Sharp con plugins instalados (columna de herramientas a la izquierda)	66
Figura 77: Página principal del programa RTLSDR Scanner	67
Figura 78: Especificaciones técnicas del Motorola DP4400	69
Figura 79: Características del Baofeng UV-5R	70
Figura 80: Pantalla principal de Radio Mobile	71
Figura 81: Ubicación del dron en la prueba de potencia	71
Figura 82: Ubicación del transmisor en la prueba de potencia	72
Figura 83: Parámetros solicitados por Radio Mobile online para realizar la simulación	72
Figura 84: Pantalla con resultados obtenido de una simulación de radioenlace en Radio Mobile Online	73
Figura 85: Prueba de potencia con el transmisor analógico Baofeng UV-5R a 144 MHz	76
Figura 86: Prueba de potencia con el transmisor analógico Baofeng UV-5R a 430 MHz	77
Figura 87: Prueba de potencia con el transmisor digital tipo DMR Motorola DP4400 a 148 MHz	77
Figura 88: Prueba de potencia con el transmisor digital tipo DMR Motorola DP4400 a 440 MHz	78



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I: The radio spectrum _____	47
Tabla II: Resultados de la prueba de potencia con SDR Sharp y la simulación de Radio Mobile para el transmisor analógico Baofeng UV-5R a 144 MHz _____	73
Tabla III: Resultados de la prueba de potencia con SDR Sharp y la simulación de Radio Mobile para el transmisor analógico Baofeng UV-5R a 144 MHz _____	73
Tabla IV: Resultados de la prueba de potencia con SDR Sharp y la simulación de Radio Mobile para el transmisor digital tipo DMR Motorola DP4400 a 148 MHz _____	73
Tabla V: Resultados de la prueba de potencia con SDR Sharp y la simulación de Radio Mobile para el transmisor digital tipo DMR Motorola DP4400 a 440 MHz _____	74



ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

- **3D** Tres Dimensiones
- **ABS** Acrilonitrilo butadieno estireno (del inglés, Acrylonitrile Butadiene Styrene)
- **ADC** Convertidor de analógico a digital (del inglés, Analog to Digital Converter)
- **AM** Modulación en amplitud (del inglés, Amplitude Modulation)
- **APSK** Modulación por desplazamiento de amplitud y fase (del inglés, Amplitude and Phase-Shift Keying)
- **ASK** Modulación por desplazamiento de amplitud (del inglés, Amplitude Shift Keying)
- **CAD** Diseño asistido por computadora (del inglés, Computer-Aided Design)
- **CPU** Unidad central de procesamiento (del inglés, Central Processing Unit)
- **DAC** Convertidor de digital a analógico (del inglés, Digital to Analog Converter)
- **DHCP** Protocolo de configuración dinámica de host (del inglés, Dynamic Host Configuration Protocol)
- **DMR** Radio móvil digital (del inglés, Digital Mobile Radio)
- **DSB** Doble banda lateral (del inglés, Double Side Band)
- **EA** Ataque electrónico (del inglés, Electronic Attack)
- **ECM** Contramedidas electrónicas (de inglés, Electronic CounterMeasures)
- **ED** Defensa electrónica (del inglés, Electronic Defense)
- **EEUU** Estados Unidos
- **EM** ElectroMagnético
- **EMS** Espectro electromagnético (del inglés, ElectroMagnetic Spectrum)
- **EPM** Medidas de defensa electrónica (del inglés, Electronic Protective Measures)
- **ES** Vigilancia electrónica (del inglés, Electronic Surveillance)
- **ESSOR** Software radio europeo seguro (del inglés, European Secure Software Radio)
- **ET** Ejército de Tierra
- **ETSI** Instituto europeo de normas de telecomunicaciones (del inglés, European Telecommunications Standards Institute)
- **EW** Guerra electrónica (del inglés, Electronic Warfare)
- **FDM** Modelado por deposición fundida (del inglés, Fused Deposition Modeling)
- **FFCCSE** Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado
- **FFF** Fabricación por filamento fundido (del inglés, Fused Filament Fabrication)
- **FM** Modulación en frecuencia (del inglés, Frequency Modulation)
- **FSF** Fundación de *software* gratis (del inglés, Free Software Foundation)
- **FSK** Modulación por desplazamiento de frecuencia (del inglés, Frequency Shift Keying)
- **GA-ASI** General Atomics Aeronautical Systems
- **GPP** Procesador de propósito general (del inglés, General Purpose Proccesor)
- **GPS** Sistema de posicionamiento global (el inglés, Global Positioning System)
- **GPU** Unidad de procesamiento gráfico (del inglés, Graphics Processing Unit)



- **HDMI** Interfaz multimedia de alta definición (del inglés, High-Definition Multimedia Interface)
- **HF** Hight Frequency
- **ICMP** Protocolo de control de mensajes de Internet (del inglés, Internet Control Message Protocol)
- **IED** Artefacto explosivo improvisado (del inglés, Improvised Explosive Device)
- **IP** Protocolo de internet (del inglés Internet Protocol)
- **LAN** Red de área local (del inglés, Local Area Network)
- **LSS** Bajo, lento y pequeño (del inglés, Low, Slow, Small)
- **MATLAB** MATrix LABoratory
- **MC3** Modernización de los sistemas de Mando, Control y Comunicaciones
- **MTOW** Peso máximo en despegue (del inglés, Maximum Take-Off Weight)
- **NBQ-R** Nuclear, Biológico, Químico y Radiológico
- **NGWS/FCAS** Nueva generación de sistemas de armas/ Futuro Sistema de combate aéreo (del inglés, New Generation Weapon System/Future Combat Air System)
- **NMEA** Asociación nacional de la electrónica marina (del inglés, National Marine Electronics Association)
- **OACI** Organización de Aviación Civil Internacional
- **OBE** Orden de Batalla Electrónico
- **ONU** Organización de las Naciones Unidas
- **OTAN** Organización del Tratado del Atlántico Norte (de inglés, North Atlantic Treaty Organization)
- **PA** Punto de Acceso
- **PC** Ordenador personal (del inglés, Personal Computer)
- **PLA** Ácido poliláctico / Políácido láctico (del inglés, Polylactic acid)
- **PM** Modulación en fase (del inglés, Phase Modulation)
- **PSK** Modulación por desplazamiento de fase (del inglés, Phase Shift Keying)
- **QAM** Modulación de amplitud en cuadratura (del inglés, Quadrature Amplitude Modulation)
- **RAM** Memoria de acceso aleatorio (del inglés, Random Acces Memory)
- **REW31** Regimiento de Guerra Electrónica N°31
- **RFB** Búfer de marco remoto (del inglés, Remote Frame Buffer)
- **RPA** Aeronave tripulada de forma remota (del inglés, Remotely Piloted Aircraft)
- **RPAS** Sistema aéreo remotamente pilotado (del inglés, Remotely Piloted Aircraft System)
- **SCRT** Sistema Conjunto de Radio Táctica
- **SDR** Radio definida por software (del inglés, Software Defined Radio)
- **SO** Sistema Operativo
- **SoC** Sistema en un *chip* (del inglés, System on a Chip)
- **SSB** Banda lateral única (del inglés, Single Side Band)



- **SSID** Service Set Identifier
- **STL** STereoLithography
- **TCP** Protocolo de control de transmisión (del inglés, Transmission Control Protocol)
- **TETRA** Radio truncal Terrestre (del inglés, TErrestrial Trunked RAdio)
- **TV** TeleVisión
- **UA** Aeronave no tripulada (del inglés, Unmanned Aircraft)
- **UAS** Sistema aéreo no tripulado (del inglés, Unmanned Aerial System)
- **UAV** Vehículo aéreo no tripulado (del inglés, Unmanned Aerial Vehicle)
- **UEW II/31** Unidad de guerra electrónica II/31
- **UHF** Ultra Hight Frequency
- **UIT** Unión internacional de Telecomunicaciones
- **USB** Bus universal en serie (del inglés, Universal Serial Bus)
- **VHF** Very Hight Frequency
- **WiFi** Wireless Fidelity



1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Antecedentes.

Dentro del Ministerio de Defensa, se están llevando actualmente distintos programas bastante conocidos por su repercusión en los medios de comunicación: el vehículo de combate sobre ruedas 8x8, por parte del ejército de tierra; la fragata F-110 y el submarino S-80, por parte de la Armada o el programa NGWS/FCAS (Ministerio de Defensa, 2021), del Ejército del Aire. Tal vez sea menos conocido, pero no menos importante el plan de modernización de los sistemas de Mando, Control y Comunicaciones (MC3).

El objetivo del plan MC3 es la modernización de los sistemas de mando, control y comunicaciones que utiliza el Ejército de Tierra para conseguir un aumento de las capacidades operativas de las unidades, a través de las nuevas tecnologías de la información y de la comunicación. Dentro del plan MC3, se encuentra el proyecto de Sistema Conjunto de Radio Táctica (SCRT), que renovará las radios tácticas que trabajan en las bandas de UHF/VHF/HF por otras que utilizarán la tecnología de radio definida por *software*. Este programa se lleva a cabo por la falta de interoperabilidad en los sistemas de comunicaciones de las fuerzas armadas cuando participan en ejercicios conjuntos o en operaciones militares en el exterior. Aparte de España, otros países vecinos están llevando a cabo programas similares, como por ejemplo en Francia con el programa CONTACT, en Italia el programa Forza NEC, en Finlandia el programa TAC WIN y en Alemania el programa SVFuA (Thales Group, 2020). Además, desde el año 2008, el Ministerio de Defensa participa en el programa ESSOR¹ (ESSOR industries, 2019), en el que se encuentra involucrada la empresa INDRA Sistemas S.A. Mediante este proyecto se quiere desarrollar y establecer una arquitectura de radio definida por *software* estándar de referencia a nivel europeo, así como también el *software* que determine la forma de onda de la señal. Entre las características que definirán a esta futura arquitectura, será la escalabilidad para su empleo sobre diferentes plataformas, y la flexibilidad, para su uso con distintos fines para poder operar entre equipos de radiocomunicaciones heterogéneos de diferentes países europeos.

1.2. Motivación.

Actualmente, casi todos los ejércitos del mundo están sometidos a un proceso de modernización. Muchos de ellos están llevando a cabo programas con empresas para conseguir desarrollar cargas de pago de guerra electrónica eficientes. Las cargas de pago (en inglés, *payload*) son todo aquel elemento que se encuentra en el dron, que no es necesario para el vuelo, pero que si lo es para el cumplimiento de la misión encomendada. Por ejemplo, la empresa GA-ASI, está realizando un proyecto, que consiste en instalar sobre un dron MQ-9 Reaper (más conocido como Predator B), que es un dron que se encuentra en servicio de la fuerza aérea y la armada de Estados Unidos, además de en otros ejércitos del mundo, una carga de pago de guerra electrónica con capacidad de realizar acciones de ataque electrónico. Otro ejemplo sería el dron Orion, un dron fabricado y diseñado por la empresa Kronshtadt para la fuerza aérea rusa y pensado para realizar misiones de reconocimiento, cuya prioridad actual por parte de la empresa fabricante es conseguir una carga de pago de guerra electrónica que realice acciones de defensa electrónica para defenderse de misiles y suprimir los sistemas enemigos en favor propio (Reyes, 2021).

En Estados Unidos, la creciente importancia que se le está dando a las cargas de pago, está desplazando parte del financiamiento de los vehículos aéreos no tripulados a mejorar los sensores. En palabras de Mike Blades (Aerospace and defense senior industry analyst at Frost & Sullivan), "Unmanned aircraft funding today is targeting the payloads more than the new airframe designs", "It is better and more cost-effective to upgrade the sensor payloads. Whatever may be the platform, the important thing is not flying 30 to 40 hours, it is about increasing the capability of the sensors"(Mchale, 2016). Aunque dicha tendencia todavía no haya llegado a nuestro país, es cuestión de tiempo de que la industria de defensa española cambie su rumbo, puesto que tanto Estados Unidos como España son miembros de la Organización del Tratado del Atlántico Norte, una alianza política y militar que cuenta actualmente con 30

¹ Gestionado por la OCCAR (Organización Conjunta de Cooperación en Materia de Armamento)



miembros, que tomas decisiones conjuntas sobre asuntos de seguridad a todos los niveles y en distintos campos (OTAN, 2021).

Además de no existir en dotación del Ejército de Tierra ninguna carga de pago de guerra electrónica, se está desarrollando en el Regimiento de Guerra Electrónica Nº31, en conjunto con la empresa Gradient y el grupo TRC, un proyecto de sistema de control de equipos remotos y vehículos no tripulados de vigilancia electrónica, formado por la estación CERVUS (Sistema de control de equipos remotos y vehículos no tripulados de vigilancia electrónica). Dicha estación está formada por distintos subsistemas, pero uno de ellos, es el subsistema de observación y vigilancia electrónica o subsistema CAPTIVE. Este sistema lo compone un dron comercial junto con un sistema de cableado compuesto por fibra óptica, que permite elevar el dron hasta 120 m. Por dicho cable viaja la señal de control, vídeo y alimentación, convirtiendo cualquier tipo de dron comercial compatible con dicho sistema en un dron cautivo. Actualmente se encuentra en desarrollo la implementación de una carga de pago de guerra electrónica dentro del sistema CAPTIVE (Regimiento de Guerra Electrónica Nº31, 2021), por lo que este trabajo será de gran utilidad.

1.3. Objetivos.

Este proyecto, que consiste en diseñar y desarrollar una carga de pago de guerra electrónica capaz de realizar medidas de apoyo electrónico a modo de prototipo, supone una forma de dar a conocer al ejército esta novedosa forma de llevar a cabo la guerra electrónica. También busca llamar la atención de empresas españolas del sector defensa, como por ejemplo Indra o Centum, para motivarlas a realizar un sistema propio de cargas de pago de guerra electrónica. Además, se espera que el trabajo sea de utilidad y aplicación para el Regimiento de Guerra Electrónica Nº31, dada la necesidad constante de mejorar sus tácticas, técnicas, procedimientos y equipos.

El objetivo principal del proyecto es conseguir desarrollar e instalar una carga de pago de guerra electrónica desde cero mediante fuentes abiertas, que sea capaz de realizar acciones de vigilancia electrónica en un dron que se encuentre en dotación del Regimiento, en concreto, el Yuneec Typhoon H plus. Además, se tendrá que realizar un soporte que ofrezca un cimiento firme a la carga de pago sobre el vehículo aéreo no tripulado.

Asimismo, como objetivos secundarios se plantea realizar dos pruebas a dicha carga de pago para verificar su operatividad y funcionalidad. Todas las pruebas se realizarán bajo un entorno lo más controlado posible para poder adquirir unos resultados fiables.

1.4. Alcance.

Respecto al alcance de la carga de pago, se espera de ella que sea capaz de realizar medidas de apoyo electrónico utilizando el *software* del que dispone. Además, también deberá mantener sus capacidades durante el vuelo del dron, dando importancia al sistema que se encargará de establecer la conexión remota y de la propia carcasa de la carga de pago, que mantendrá su integridad física.

1.5 Metodología.

Una vez detectada la carencia de que el Ejército de Tierra no dispone de ninguna carga de pago de guerra electrónica, se planteó su desarrollo, diferenciado en dos partes: la parte *hardware*, y la parte *software*.

Para el desarrollo de la parte *hardware* de la carga de pago se utilizó un miniordenador, una batería portátil, una antena con sistema de posicionamiento global con salida USB y una radio definida por *software* con salida USB. Todas estas partes (a excepción de la antena con sistema de posicionamiento global con salida USB) fueron adquiridas en comercio por el autor. El soporte fue diseñado por el autor mediante *software* de diseño asistido por computadora y posteriormente impreso en una impresora 3D propia del Regimiento de la que se pudo hacer uso.

Una vez conseguida la parte *hardware*, se procedió a instalar todo el *software* necesario en el miniordenador. Tanto el sistema operativo como los programas pertinentes, han sido descargados de fuentes abiertas totalmente gratuitas.



Terminada tanto la parte *hardware* como *software* de la carga de pago, se procedió a establecer un sistema de comunicación entre la estación en tierra, que consistía en el ordenador personal del autor, y la carga de pago. Dicho sistema se constituyó en configurar un punto de acceso WiFi en la carga de pago, al cual se accedía mediante el ordenador personal. Para aumentar la distancia del sistema de comunicación, se hizo uso de una antena WiFi USB, también adquirida por el autor.

Finalizado el montaje del sistema, se procedió a la realización de dos pruebas con el *software* de la carga de pago para comprobar su funcionamiento.



2. CONCEPTOS PREVIOS Y ESTADO DEL ARTE.

En este apartado se van a describir una serie de conceptos previos, necesarios para poder entender el resto del trabajo, así como un breve resumen de las tecnologías empleadas y su estado del arte.

2.1. Telecomunicaciones.

Una onda es un movimiento vibratorio o perturbación que se propaga a través del medio sin una transferencia de materia, pero sí de energía, siguiendo el principio de Huygens. A grandes rasgos, las ondas se clasifican según el medio de propagación: ondas mecánicas y ondas electromagnéticas (EM). Las ondas mecánicas requieren de un medio material para propagarse, como por ejemplo las ondas sísmicas, el sonido o las ondas que se generan en el agua al lanzar un objeto. Las ondas EM no necesitan un medio material para propagarse, un ejemplo de onda EM sería la luz visible (Méndez, 2009). Las ondas más simples son las ondas sinusoidales, y dado que cualquier onda puede representarse como una suma de este tipo de ondas mediante el análisis de Fourier² (Sánchez Tapia, 2020a), se van a definir los parámetros que caracterizan estas ondas armónicas:

- Longitud de onda (λ): es la separación que existe entre dos puntos consecutivos que se encuentren en misma fase, o lo que es lo mismo, la separación que hay entre dos oscilaciones consecutivas. Se mide en metros (m).
- Frecuencia (f): es la velocidad a la que se repite la perturbación. Se mide en Hercios (Hz).
- Periodo (T): es el tiempo que tarda la perturbación en repetirse. Es la inversa de la frecuencia y se mide en segundos (s).
- Amplitud (A): es el valor máximo que haya alcanzado la magnitud que varía en la onda. Su unidad de medida depende del tipo de onda, por ejemplo, para ondas de presión (como el sonido), se mediría en Pascales (Pa).
- Velocidad de propagación: Es la velocidad a la que se propaga la perturbación en el medio. Esta velocidad depende del tipo de onda y del medio de propagación. Para las ondas EM, la velocidad de propagación en el vacío es aproximadamente de 300 Km/s (c).

En la Figura 1 pueden verse los parámetros que caracterizan las ondas armónicas.

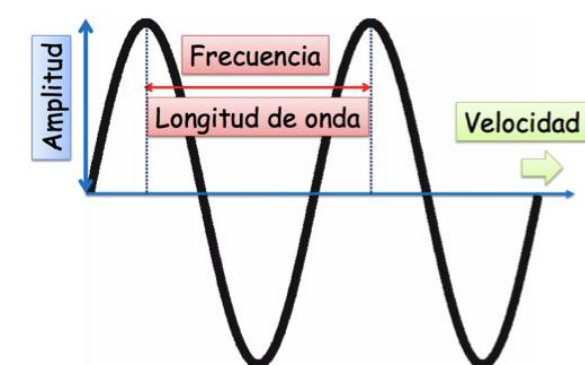


Figura 1: Parámetros de una onda. Fuente: (Peralta, 2014).

Las ondas EM, son un tipo de ondas en el que el tipo de perturbación viene definida por variaciones del campo eléctrico y del campo magnético. Ambos campos son perpendiculares entre sí, y a su vez son perpendiculares a la dirección de propagación. Estas ondas se propagan de diferentes maneras y formas, en función del tipo de onda que se esté propagando (Butcher *et al.*, 2016).

El modo en el que se va a propagar la onda EM en el medio natural varía con la frecuencia de trabajo. En el Anexo I, se recogen las distintas bandas de frecuencia que se utilizan en las telecomunicaciones (ondas radio) y para qué se utilizan.

² Desarrollo en serie y transformada de Fourier.



El conjunto de todas las posibles frecuencias de ondas EM se denomina espectro electromagnético (EMS, del inglés ElectroMagnetic Spectrum). Este EMS es un recurso natural, al igual que el gas natural, el petróleo o el agua, y por ello, necesita de una organización supervisora para su gestión. Esta organización es la Unión Internacional de Comunicaciones (UIT), que nació por dos factores. Uno de ellos fue la creciente demanda del uso electromagnético. El segundo factor fue que los avances tecnológicos permitían utilizar el mismo ancho de banda más eficientemente y de una forma más eficaz (Herter, 1985).

La ITU es un organismo especializado de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para las tecnologías de la información y de la comunicación, y es el sector de radiocomunicaciones de la ITU (ITU-R), quien se encarga de la gestión internacional del espectro de frecuencias radioeléctricas y de las órbitas de los satélites de telecomunicaciones (Unión internacional de telecomunicaciones, 2021).

Los sistemas de telecomunicaciones utilizan las ondas EM para generar señales. Las señales son una función de una o más variables que contiene información sobre el comportamiento o la naturaleza de algún fenómeno cuantificable, desde un sistema transmisor (o sistema fuente), hacia un sistema receptor (o sistema destino) a través de un canal de transmisión, que puede ser guiado o inalámbrico. En la Figura 2 puede apreciarse el modelo básico de un sistema de comunicaciones esquemáticamente, donde se pueden observar todos los elementos que intervienen en la comunicación.

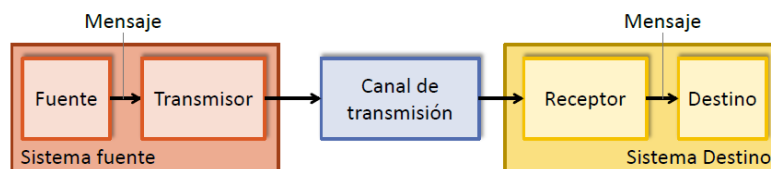


Figura 2: Modelo básico de un sistema de comunicaciones. **Fuente:** (Sánchez Tapia, 2020b).

Las señales generadas por los sistemas se pueden representar en el dominio del tiempo (representación cartesiana), o el dominio de la frecuencia (representación espectral), la cual se obtiene mediante el análisis de Fourier y que es muy interesante para ver las componentes espectrales de la señal (espectro de frecuencias) y el ancho de banda, que es el intervalo de frecuencias en el que se concentra la mayor parte de la energía de la señal. En la Figura 3 se pueden observar ambas representaciones, arriba la representación temporal, y abajo la frecuencial.

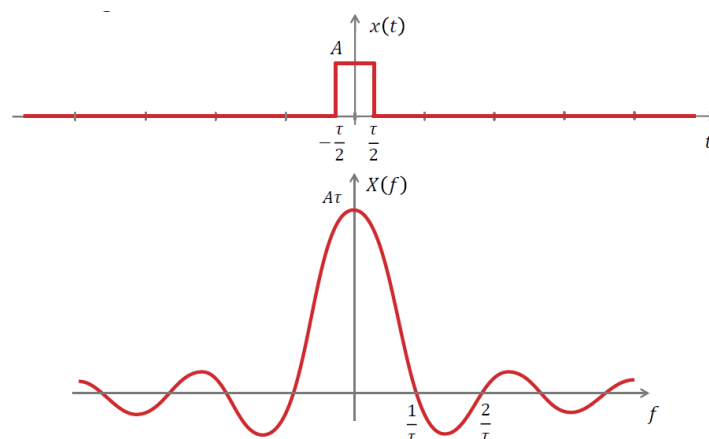


Figura 3: Representación temporal y frecuencial de una señal. **Fuente:** (Sánchez Tapia, 2020a).

Estos sistemas se componen de distintas partes, necesarias para su funcionamiento, como moduladores, amplificadores, ecualizadores, filtros, etc. Los sistemas se dividen en función de la técnica de transmisión en: sistemas analógicos y sistemas digitales. Los sistemas analógicos son los que envían señales analógicas, que son ondas que pueden tomar cualquier valor con una resolución teóricamente infinita. Los sistemas digitales cuando son los que envían señales digitales, que son señales que solo toman valores discretos. En la transmisión de los datos existen cuatro combinaciones posibles: dato analógico – señal analógica, dato digital – señal analógica, dato analógico – señal digital y dato digital –



señal digital. Los sistemas que transmiten señales digitales a partir de datos analógicos requieren un paso más que los que no necesitan esa conversión, ya que la señal original debe ser digitalizada en el transmisor mediante un conversor de analógico a digital (ADC, del inglés Analog to Digital Converter), y en el receptor realizar (o no) el paso contrario mediante un conversor de digital a analógico (DAC, del inglés Digital to Analog Converter) (Izquierdo Nuñez, 2020) (Sánchez Tapia, 2020b) (Romero Ternero, 2005).

El canal de transmisión es una parte muy importante del sistema, ya que, si el ancho de banda de la señal no coincide con el ancho de banda del canal, se deberá modular, proceso por el cual se cambia (normalmente aumenta) la frecuencia de la señal con un modulador, para poder trasmitirla. En recepción, la señal modulada deberá demodularse mediante un demodulador para recuperar la información. Este tipo de transmisión se conoce como transmisión en banda modulada, y se utiliza cuando se quiere adaptar la señal al medio. Si no se modula la señal, la transmisión se conoce como transmisión en banda base.

Tanto las señales analógicas, como las digitales se pueden modular y existen distintos tipos de modulaciones. La modulación se basa en transmitir una señal sinusoidal, denominada señal portadora, en la que la amplitud, la frecuencia, o la fase son función del valor instantáneo de la señal original, denominada moduladora. Si la amplitud es la variable que varía con respecto a la señal moduladora, hablamos de modulación de amplitud (AM, del inglés Amplitude Modulation), si es la frecuencia (FM, del inglés Frequency Modulation) o la fase (PM, del inglés, Phase Modulation) de la señal portadora lo que varía, se habla de modulación angular. Como resultado de estas modulaciones, se obtendrá una señal modulada. En la Figura 4 podemos ver la representación temporal de las modulaciones AM, FM y PM respectivamente de izquierda a derecha.

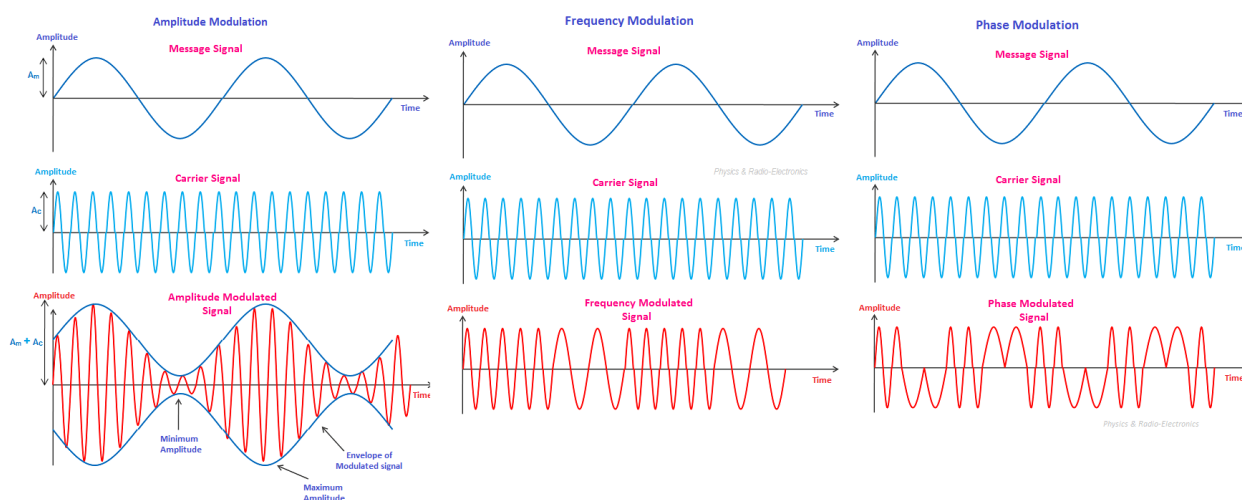


Figura 4: Modulaciones AM, PM y PM. **Fuente:** (Shaik, 2021a, 2021b, 2021c).

Para señales analógicas, las modulaciones de amplitud más conocidas son doble banda lateral (DSB, del inglés Double Side Band), banda lateral única (SSB, del inglés Single Side Band) y AM. Para modulaciones angulares, la más importantes son FM y PM. Para señales digitales, las modulaciones en amplitud se conocen como modulación por desplazamiento de amplitud (ASK, del inglés Amplitude Shift Keying), las angulares de frecuencia se denominan modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK, del inglés Frequency Shift keying), y las de fase modulación por desplazamiento de fase (PSK, del inglés Phase Shift Keying). Para las modulaciones digitales, existen modulaciones híbridas como la modulación por desplazamiento de amplitud y fase (APSK, del inglés Amplitude Phase Shift Keying), que combina modulación en amplitud y de fase, o la modulación en cuadratura de amplitud (QAM, del inglés Quadrature Amplitude Modulation), que combina también modulación en amplitud y fase (Sánchez Tapia, 2020c) (Sánchez Tapia, 2020d) (Núñez, 2020).



2.2. Guerra electrónica y medidas de apoyo electrónico.

La guerra electrónica (EW, del inglés Electronic Warfare) es la acción militar que se enfoca a explotar y controlar el EMS. Gracias a la EW, las fuerzas aumentan su probabilidad de supervivencia y de éxito de las operaciones en zona hostil (Waghray, 2012). La EW compete a los tres ejércitos (tierra, mar y aire), ya que todos explotan el EMS para el mando y control de las operaciones, sistemas de adquisición de objetivos y control de sistemas de armas. En la Figura 5, se pueden ver las múltiples plataformas de los ejércitos de aire, mar y tierra que utilizan el EMS en un típico ambiente táctico.

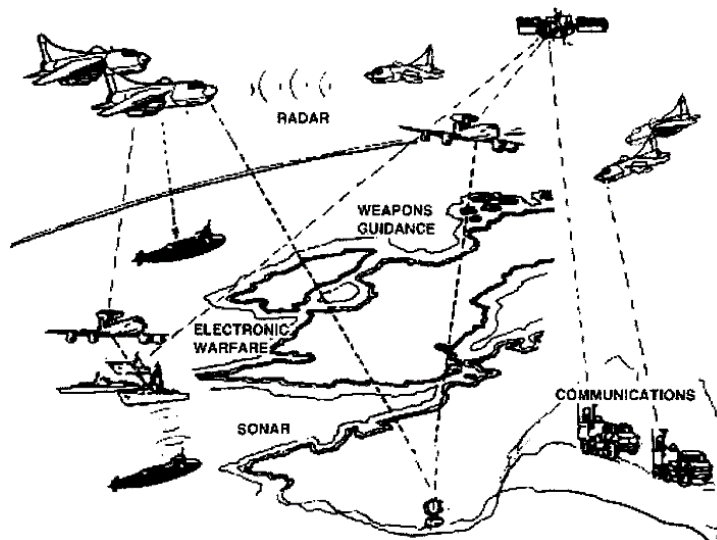


Figura 5: Entorno táctico de la EW. Fuente: (Spezio, 2002).

Para llevar a cabo la EW, se realizan tres tipos de acciones (Spezio, 2002):

- Ataque electrónico (EA, del inglés Electronic Attack): los ataques electrónicos se basan en utilizar el EMS con propósitos ofensivos.
- Defensa electrónica (ED, del inglés Electronic Defence): igual que el EA, pero con propósitos defensivos.
- Vigilancia electrónica (ES, del inglés Electronic Surveillance): equivalente a los anteriores, pero lo que se busca es obtener información a partir de las emisiones EM.

Dentro de la EW, se utilizan tres herramientas o medidas para conseguir lo que el mando ha determinado en las operaciones militares: medidas de apoyo electrónico (ESM, del inglés Electronic Support Measures), contramedidas electrónicas (ECM, del inglés Electronic Counter Measures) y medidas de protección electrónicas (EPM, del inglés Electronic Protective Measures). Debido al enfoque del trabajo, solo nos delimitaremos a explicar las ESM.

Las ESM realizan actividades de búsqueda, interceptación, identificación y localización de las emisiones electromagnéticas. El objetivo final de estas actividades es el reconocimiento inmediato de la amenaza, y la obtención de información sobre la situación electromagnética de una zona concreta, la cual se plasma en el Orden de Batalla Electrónico (OBE), además de otros productos como informes y bases de datos de EW. El OBE contiene toda la información disponible hasta el momento sobre los emisores electromagnéticos que se han detectado sobre un área determinada (Sistema de observación y prospectiva tecnológica, 2009).

El ejército americano opina que entrenar a todos los soldados en la EW es primordial para la guerra del futuro. Lograr un conocimiento básico de cómo los sistemas operan el EMS y cómo aparecen en los sistemas de EW es una asignatura pendiente, pero que ya han comenzado a trabajar en ella. Una vez adquirido los conceptos básicos del EMS y de la EW, los soldados pueden reducir su firma electrónica aplicando reducciones de potencia en los transmisores o con el establecimiento de posiciones favorables para degradar la señal en la posible dirección de fuerzas enemigas, entre otras muchas más medidas (Asymmetric Warfare Group Personnel, 2020).



Las tendencias futuras de la EW, tomando como horizonte temporal el año 2030, muestran que el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV, del inglés Unmanned Aerial Vehicle) de pequeño tamaño para la EW, adquirirá un papel primordial. Uno de los escenarios operativos más probables en el futuro serán las zonas urbanas. En estas zonas, tanto la visibilidad como la maniobrabilidad de las unidades de guerra convencionales es un factor a tener en cuenta, debido a que dichas unidades cuentan con sistemas de EW instalados, pero que no serían utilizados efectivamente por el posible apantallamiento de los obstáculos urbanos, como los edificios, escombros, etc. En este tipo de ambientes, resulta de mayor interés equipos de EW que puedan aproximarse a las amenazas lo máximo posible, con el objetivo de mejorar en gran sustancia el conocimiento de la situación operativa. El uso de UAV de pequeño y medio tamaño para este tipo de reconocimientos es una alternativa muy factible, dado que reduce significativamente el riesgo y el coste en estas misiones, además de poder abrirse un abanico de posibilidad de misiones, ya que los UAV pueden soportar misiones de larga duración, y de ambientes NBQ-R, que lógicamente un ser humano no podría soportar. A pesar de que los UAV de pequeño y medio tamaño no cuentan con la capacidad de soportar en vuelo equipos muy potentes de EW que puedan realizar ESM, se podría llegar a utilizar un enjambre de este tipo de drones, que funcionando de una manera conjunta, podrían conseguir unas prestaciones mucho más elevadas que un solo UAV de mayor tamaño (Sistema de observación y prospectiva tecnológica, 2009).

Los grandes avances tecnológicos que se están desarrollando en nuestros días, hacen que las tecnologías en materia de defensa se encuentran por detrás de las tecnologías civiles. A esto hay que sumar el hecho de que existen disponibles a la venta de cualquier tipo de cliente equipos de EW y *software* completamente gratuito, disponible en la red, con el que se pueden realizar acciones de EW (O'Connor, 2019). Una persona con unos conocimientos no muy amplios puede llegar, o no, a causar muchísimo detrimento en nuestra sociedad, desde simplemente escuchar alguna conversación sin cifrar de la grúa municipal, hasta el uso por parte de la insurgencia para interceptar una comunicación militar, obteniendo información sobre el itinerario a realizar por un convoy, su organización y tipo de vehículos, pudiendo saber dónde y cuándo colocar un artefacto explosivo improvisado (IED, del inglés Improvised Explosive Device) para hacer el máximo daño posible. Como dijo Thomas Hobbes en su libro el Leviatán, “quien tiene la información, tiene el poder”, y quien tiene la información, tiene la posibilidad de obrar a su antojo con ella, tanto para bien, como para mal. Esta afirmación queda demostrada con esta clase de prácticas que suceden en el mundo, lejos de nuestras fronteras, pero que no dejan de suceder por el simplemente hecho de no ser vistas.

2.3. Radio definida por *software*.

La radio es una tecnología inalámbrica de radiocomunicación para transmitir o recibir radiación electromagnética, que facilita la transferencia de información. Estos dispositivos están formados por circuitos electrónicos discretos y componentes electrónicos que no se pueden modificar después de su fabricación. Fue el 14 de mayo de 1897, cuando el ingeniero eléctrico italiano Guglielmo Marconi, realizó la primera transmisión de radio de la historia³. Por sus logros, en 1909 fue galardonado con el premio nobel de física junto con el físico alemán Carl Ferdinand, con el que compartió el premio por sus contribuciones a las comunicaciones por radio (Gavaldá, 2019).

Desde entonces, se han producido numerosos avances en el ámbito de las telecomunicaciones. Muchos de ellos se produjeron durante la primera y la segunda guerra mundial, debido a la necesidad tecnológica que requerían los ejércitos para establecer sus comunicaciones. Los hitos principales que se produjeron se pueden observar en la línea del tiempo de la Figura 6.

³ La transmisión inalámbrica que realizó fue desde el canal de Bristol (Inglaterra), a Penarth, a través de mar abierto y en código Morse.

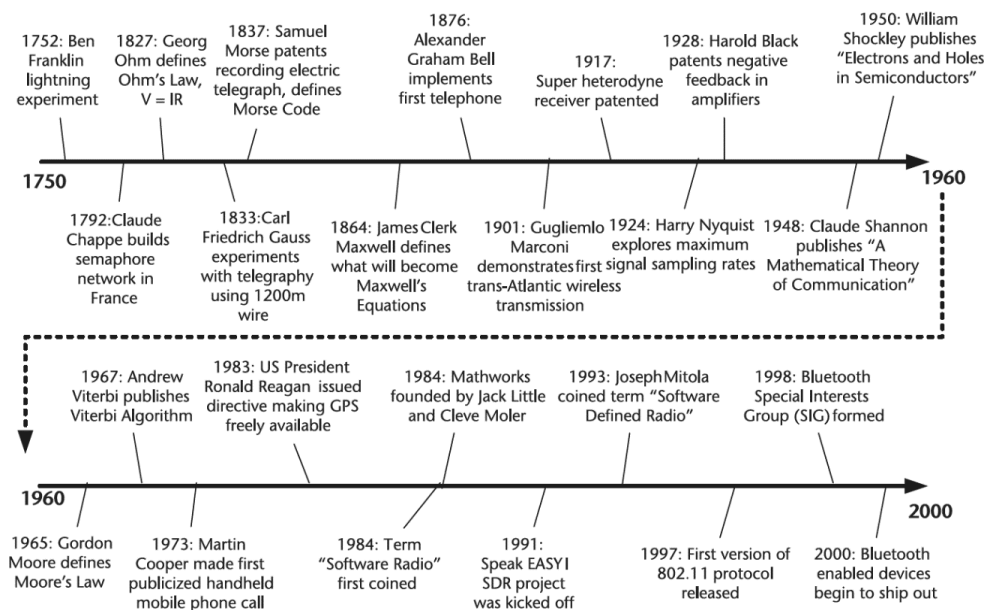


Figura 6: Línea del tiempo con los principales hitos en telecomunicaciones. Fuente: (Collins et al., 2018)

El origen de la radio definida por *software* (SDR, del inglés Software Defined Radio) se remonta a 1984 cuando apareció por primera vez el término de SDR, que fue concebido por un equipo de la antigua compañía E-Systems Inc. (ahora Raytheon Technologies), en la ciudad de Garland (Estado de Tejas, Estados Unidos) (Collins *et al.*, 2018). Más adelante, se inició el proyecto SPEAKeasy por parte del ejército americano, que buscaba la implementación de la SDR para aplicaciones militares (Cook and Bonser, 1999).

La SDR es básicamente una radio en la que una o todas las partes que realizan las funciones de la capa física, son sustituidas por *software*. En la Figura 7, se muestra un esquema general de la arquitectura de una SDR. En esta figura se pueden ver todos los componentes *hardware*, que van desde la antena, hasta los ADC y DAC. El bloque de procesamiento digital de la señal viene definido por los algoritmos de *software* que se han programado para la SDR.

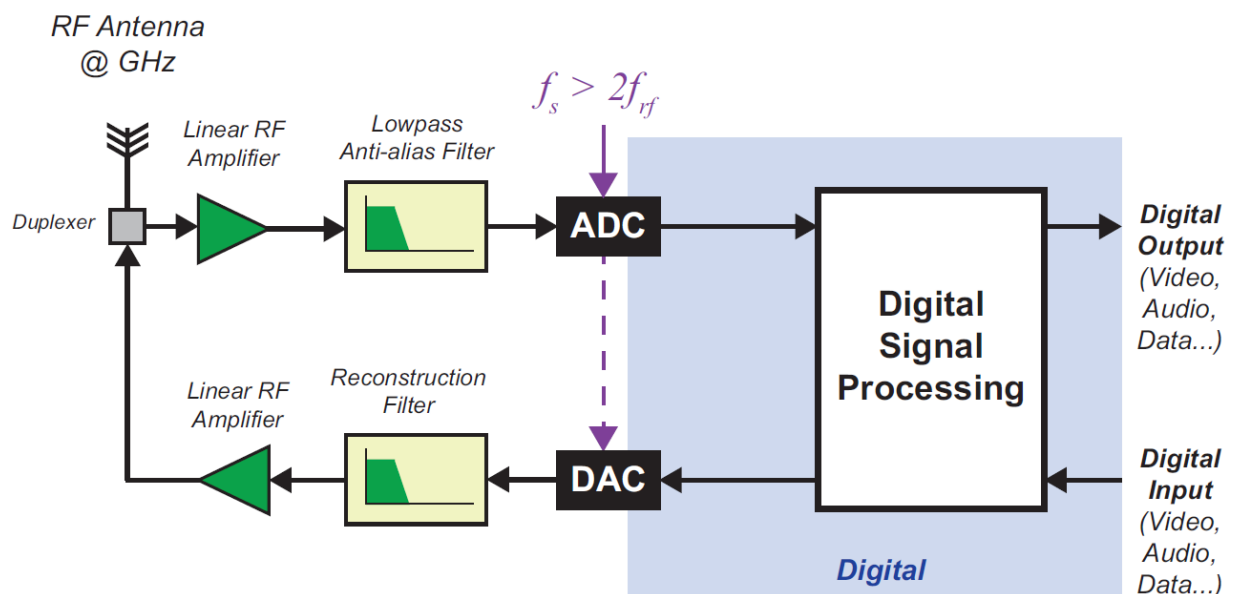


Figura 7: Esquema general de la arquitectura de una SDR. Fuente: (Stewart et al., 2017).

El uso de esta tecnología se extiende a numerosos ámbitos: militar, investigación, comercial, aficionados, etc. En el ámbito militar, la Unidad de Guerra Electrónica ligera II/31 (UEW II/31), del



Regimiento de Guerra Electrónica Nº31 (REW31), que ha estado desplegado en numerosas misiones en el exterior⁴, utiliza esta tecnología. En la Figura 8 se puede ver el escudo de armas de la UEW II/31.



Figura 8: Escudo de armas de la UEW II/31. **Fuente:** REW31.

En el campo de la investigación, un ejemplo sería el proyecto Tactica, que se realizó en atlantTic, el centro de investigación de tecnologías de telecomunicaciones, promovido por la universidad de Vigo (Galicia, España), en el que se utilizó la SDR para validar algoritmos para comunicaciones adaptativas en escenarios reales (Tato, 2018). En el Anexo III se puede ver el diagrama de bloques del sistema de comunicaciones satélite creado expresamente para el proyecto Tactica.

En el ámbito comercial, existen numerosos fabricantes de SDR como Great Scott Gadgets, con su famosa SDR Hack RF One, Airspy y su SDR Airspy HF+, o RTL-SDR con su RTL2832U, que ha sido la utilizada para el trabajo. Tanto la SDR Hack RF One, como la SDR Airspy HF+, se pueden ver en la Figura 9.



Figura 9: SDR Hack RF One (izquierda) y SDR Airspy HF + (derecha). **Fuente:** (Astroradio, 2021a; US, 2021).

En el mercado existe un amplio rango de precios para las SDR, pero también se encuentran las SDR de coste cero, basadas en red, como por ejemplo la WebSDR, que es una SDR conectada a internet, que permite a cualquier persona escuchar y sintonizar simultáneamente. Esta SDR nació de un proyecto de la universidad de Twente (Enschede, Países Bajos), organizado y liderado por el Dr. Peter Deboer (Alias PA3FWM) (Mascareñas y Pérez-Iñigo et al., 2016). A día de hoy, cuentan con cuatro estaciones receptoras en la península Ibérica, cada una en una localización distinta: Asturias, Barcelona, Madrid y Alicante. En Anexo IV se pueden ver dos capturas de pantalla de la webSDR.

⁴ Bosnia y Herzegovina (misión precursora de la unidad), operación Libre Hidalgo (Líbano), operación Romeo Alfa (Afganistán), operación RCA (República Centro Africana), operación Atalanta (Costas de Somalia, Océano indico), operación enhanced Forward Presence (eFP) (Letonia), operación EUTM-Malí (Bamako, capital de Malí) y la operación RSM (Provincia de Kabul, República Islámica de Afganistán) (Regimiento de Guerra Electrónica Nº31, 2021).



Como podemos ver, las SDR están bastante extendidas hoy en día y es relativamente fácil acceder a este tipo de tecnología, ya que, aunque no dispongamos de un presupuesto muy elevado, se puede recurrir a las opciones de coste más reducido como la RTL2832U, o simplemente las opciones sin coste, como son las SDR bajo red.

Las SDR presentan una serie de ventajas respecto a las radios convencionales (Arcos and Ferreri, 2016) (Keim, 2017):

- No se necesita disponer de un *hardware* específico diseñado específicamente para recibir o transmitir un determinado tipo de señal, ya que todo el hardware se sustituye por un *software*, de tal manera que la SDR puede ejecutarse en distintas arquitecturas. También existe la posibilidad de crear una arquitectura genérica, como por ejemplo los procesadores de propósito general (GPP, del inglés General Purpose Processor). Esta característica se podría resumir en la gran flexibilidad que ofrecen las SDR al trabajar con ellas.
- En relación con el anterior apartado, el diseño de una arquitectura genérica que soporte un gran número de SDR distintas, abarata costes de producción, obteniendo un mayor beneficio al fabricante.
- Los tiempos de actualizar los equipos son mucho menores y menos costosos, ya que solamente se tienen que reescribir los módulos del programa, evitando el desmontaje y sustitución de piezas, como ocurre con las radios convencionales

Aunque las SDR presentan numerosas ventajas, sus desventajas son las que han impedido que se remplace totalmente los equipos convencionales por esta tecnología (Arcos and Ferreri, 2016)(Keim, 2017):

- El *software* que se encarga del procesamiento de la señal, y que sustituye al *hardware* convencional, añade tiempo de procesamiento. Como consecuencia, para obtener una SDR con las mismas prestaciones que una radio convencional, se necesita un *hardware* más potente.
- No existen muchos entornos que permitan desarrollar el *software* que ejecuta una SDR. Las mejores alternativas que existen actualmente son SDR Sharp, MATLAB/Simulink y GNU Radio.
- Generalmente las SDR requieren un extensivo desarrollo de *software* y diseño muy complicado del circuito eléctrico impreso. Además, sus componentes, no son tampoco excesivamente baratos.

Entre los entornos de trabajo de SDR, destaca GNU Radio un *software* gratis y de código abierto, programado en Python y C++. Cuenta con una interfaz gráfica que se utiliza para diseñar y gestionar los bloques de procesamiento de señales, permitiendo al usuario crear programas de procesamiento de señales, evitando escribir el código de programación (Robert and Fette, 2009; National Instruments, 2019). En el Anexo II podemos ver la pantalla principal del entorno GNU Radio. Además, en ese mismo anexo se muestran dos ejemplos de diagramas de bloques en GNU Radio para un transmisor SSB y un receptor SSB respectivamente.

2.4. Vehículos aéreos no tripulados.

Primeramente, se va a arrojar un poco de luz sobre los distintos conceptos que abarcan este tipo de plataformas. Las aeronaves no tripuladas (UA, del inglés Unmanned Aircraft) o UAV, son aquellas plataformas aéreas que vuelan sin un piloto a bordo y se enmarcan dentro de los sistemas aéreos no tripulados (UAS, del inglés Unmanned Aerial System). Los UAV puede programarse para seguir una ruta específica o simplemente ser pilotados de manera remota. Cuando los UAV son pilotados de forma remota, se denominan aeronaves pilotadas por control remoto (RPA, del inglés Remotely Piloted Aircraft), que también se encuentran dentro de los sistemas de aeronaves pilotadas por control remoto (RPAS, del inglés Remotely Piloted Aircraft System). Por tanto, los RPAS pertenecen a un subgrupo de los UAS, por lo que no todos los RPAS se pueden considerar UAS. Para terminar con terminología, los drones son



considerados por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI)⁵ como RPAS que tienen un peso por debajo de los 25 Kg (INTA Copernicus Relay, 2019).

A lo largo del trabajo, se hablará más comúnmente de UAV o dron para referirnos a la plataforma, puesto que el dron que se ha utilizado permitía realizar rutas programadas y ser operado por un piloto. Los UAV son plataformas aéreas que pueden tener arquitecturas muy diversas, pero que se dividen en dos categorías: las de ala fija, y las de alas rotatoria. Las plataformas aéreas de ala rotatoria pueden estar compuestas por más de un rotor. También existen combinaciones de ambos grupos, los cuales se denominan híbridos. En el Anexo VI se muestra la tipología de los drones atendiendo a su arquitectura (Ministerio de Fomento, 2018).

La Joint Capability Group on UAV (JCGUAV) de la Organización del Tratado Atlántico Norte (OTAN) clasifica a los RPAS en función del peso máximo al despegue (MTOW, del inglés Maximun Take Off Weight) y su altura normal de operación⁶. Encontramos tres clases. A la clase III pertenecen los drones RPAS que tienen un MTOW mayor de 600 Kg. Después se encuentran los RPAS de clase II, con un MTOW menor que 600 Kg, pero mayor que 150 Kg. Por último se encuentran los de clase I, que tienen un MTOW menor de 150 Kg (Dirección General de Armamento y Material, 2015). Esta clasificación a nivel OTAN también se puede ver en el Anexo VI de una forma más esquemática.

Nos centraremos en los RPAS de clase I, por ser de aplicación en este proyecto. Esta categoría es la que más sistemas abarca, debido a varias razones (Dirección General de Armamento y Material. Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica, 2016):

- Presentan en general, un menor coste de desarrollo y fabricación en comparación con los RPAS de clase II y III.
- El desarrollo tecnológico de las baterías permite mejorar sus características y aumentar el tipo de misiones donde se pueden utilizar.
- Sufren actualmente un desarrollo tecnológicamente muy elevado, con un precio muy económico, lo cual permite contar con los últimos sistemas en las distintas unidades del ejército.
- Debido a sus dimensiones, la firma logística que generan es mínima.
- Sus sistemas de control son sencillos en el manejo y de tamaño muy reducido, pudiendo ser portados por una sola persona.
- Tienen una gran rapidez y velocidad de despliegue.

Los RPAS de clase I se suelen denominar en terminología OTAN como LSS. La “L” hace referencia a que tienen poco peso (Light), tanto en sí mismos, como de la carga de pago. La primera “S” se refiere a que son de un tamaño muy pequeño (Small). La segunda “S” es por el corto alcance que tienen (Short). Esta clase se divide en 5 subcategorías: nano, micro, mini ligero, mini pesado y pequeños. Las características de estas distintas categorías se encuentran en el Anexo VI. En el presente trabajo nos centraremos en los UAV de subclase mini ligero, por ser de uso en esta memoria.

En el mercado, una de las empresas líderes en el sector es DJI, una empresa china con sede en Shenzhen (Provincia de Guangdong, China), que se dedica principalmente al desarrollo y fabricación de RPAS mini ligeros (clase I) y de cámaras (DJI, 2021b). En 2017, sus drones representaron más del 70% del mercado mundial de drones, facturando un total de 2,7 billones de dólares (Borak, 2018). Ha tenido muchas controversias a lo largo de estos años, como por ejemplo cuando en diciembre de 2020, Estados Unidos (EEUU) bloqueo comercialmente a DJI, al igual que a la empresa Huawei, por su posible relación

⁵ Es un organismo especializado de las naciones unidas que establece normas y métodos recomendados para el desarrollo seguro y ordenado de la aviación civil internacional (*Organización de aviación civil internacional (OACI)*, 2021)

⁶ En caso de conflicto entre el MTOW y la altura de operación normal, prevalece la primera sobre la segunda.



con el gobierno chino y la guerra comercial que estaba y sigue teniendo lugar entre ambos países (Pérez, 2020). A pesar de estos inconvenientes, cuentan una serie de UAV muy potentes, como el DJI Matrice 600 Pro (Figura 10), el más poderoso de sus drones. Aunque este dron es para uso profesional en empresas de videografía, pro las características que ofrece, se podría adaptar para realizar otro tipo de cometidos (DJI, 2021c).



Figura 10: Dron DJI Matrice 600 Pro. **Fuente:** (DJI, 2021a).

Cada vez más, aparecen drones con mejores prestaciones, que permiten plantear su uso en nuevos ámbitos. Entre los desarrollos tecnológicos que promueven este avance están principalmente: el empleo de nuevos materiales, más ligeros y flexibles; el aumento de la capacidad de las baterías y su menor peso; y por último la miniaturización y reducción en costes de la electrónica. Adicionalmente, los nuevos sensores, más potentes, versátiles y con una mayor capacidad de procesamiento de datos. Entre las aplicaciones más importantes en un futuro próxima para los drones serán: obras civiles, seguridad y emergencias, telecomunicaciones, transporte de paquetería y personas, entretenimiento, aplicaciones específicas urbanas y en el campo de la defensa (Ministerio de Fomento, 2018).

Entre las aplicaciones en cuestiones de defensa de los drones, se suelen utilizar principalmente en misiones de inteligencia, reconocimiento y vigilancia, como los RPAS Seeker que ya se encuentran en dotación de unidades de élite de nuestro ejército como la Brigada “Almogávares” VI de paracaidistas del Ejército de Tierra (ET), o la Brigada de Infantería de Marina del Tercio de la Armada (Defensa, 2021). No solo las unidades del ejército dedicadas al combate utilizan UAV, también la Unidad Militar de Emergencias (UME) cuenta en dotación con este tipo de material, con el que puede realizar, por ejemplo, la monitorización de día y de noche de la actividad volcánica que está teniendo lugar a día de realización de la memoria en La Palma (Islas Canarias) mediante una cámara térmica como carga de pago (De Miguel, 2021).

Hay que tener en consideración que los grupos terroristas pueden hacer uso de los drones para llevar a cabo atentados ya que el acceso a esta tecnología es sencillo. Cualquier persona puede adquirir un dron al que adherirle una carga explosiva para posteriormente lograr un ataque. Puede que el objetivo de estos grupos terroristas no sea conseguir muertes, sino simplemente sembrar el pánico entre la población, lo cual se puede conseguir esparciendo cualquier tipo de producto de limpieza con el dron sobre un grupo de personas. Los daños que se pueden ocasionar son numerosos, y muchos grupos terroristas están experimentando el uso de drones en sus ataques, aunque ya se demostró su utilidad por parte del grupo terrorista “Estado Islámico” durante la batalla de Mosul (Irak) en 2016-2017. Los rápidos avances en la tecnología dron y su incremento de capacidades está facilitando a los grupos terroristas nuevas formas de producir miedo (G. Pledger, 2021).



3. INTEGRACIÓN DE LA CARGA DE PAGO DE GUERRA ELECTRÓNICA SOBRE VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO.

En el siguiente apartado se van a describir los elementos necesarios, tanto *hardware* como *software*, para el desarrollo e instalación de la carga de pago de EW sobre UAV, así como su integración y funcionamiento.

3.1. Hardware.

En este apartado se va a explicar el *hardware* que se ha utilizado para el desarrollo e instalación de la carga de pago de EW sobre UAV.

En la Figura 11 se pueden observar todos los elementos *hardware* que conforman la carga de pago: batería portátil, Raspberry Pi 3 Model B+, SDR RTL2832U con su antena dipolo y la antena GPS USB. Toda la carga de pago ha sido íntegramente desarrollada por el autor.



Figura 11: Dron junto con la carga de pago de EW. Fuente: Elaboración propia.

3.1.1. Radio definida por *software*: RTL-SDR V3.

La RTL-SDR V3 (Figura 12) es una SDR de bajo coste (20 \$ - 40 \$) basada en los *dongles* receptores DVB-T TV (Televisión digital HD) que utilizan los *chips* RTL2832U. Este *chip* tiene la característica de que puede utilizarse como una SDR general de banda ancha. Modificando dicho *chip* con una serie de *drivers*, se consigue un receptor SDR con unas características similares a otras SDR que se encuentran en el mercado por precios que rondan entre los cientos y los miles de dólares. Si que es verdad que las SDR específicamente diseñadas tienen un mayor rendimiento que la RTL-SDR, pero en cuanto a relación calidad-precio, supone una opción muy interesante para iniciarse en la tecnología SDR (Laufer, 2018). Las especificaciones técnicas de la RTL SDR V3 pueden consultarse en el Anexo IX.



Figura 12: RTL-SDR V3. Fuente: (Amazon, 2021c).



Una de las ventajas que ofrece la RTL-SDR V3 es que se uso está muy extendido por todos los radios aficionados, por lo que siempre que se tenga alguna duda o problema, se puede recurrir a cualquier tipo de foro donde la pregunta será respondida en apenas unas horas. Además, cuenta con una gran comunidad que se dedica a programar *software* gratuito para esta SDR.

El ADC de la RTL-SDR es de tipo 8-bit. Cuantos más bits tenga el *microchip* ADC, más precisión tiene a la hora de realizar el proceso de digitalización de la señal. Para ADC con un valor bajo de bits de precisión, los pequeños detalles de la señal analógica de entrada se pueden perder durante la digitalización, más aún si la potencia de la señal es baja. El valor de 8 bits es lo suficientemente alto como para conseguir un rendimiento decente.

El ancho de banda de la SDR se refiere al espectro de radiación EM que puede verse al mismo tiempo. Para la RTL-SDR, su ancho de banda máximo es de 3,2 MHz, sin embargo, el valor máximo estable es de 2,8 MHz. Por encima de 2,8 MHz, las muestras recibidas serán eliminadas.

La antena utilizada por la SDR fue una antena dipolo (en concreto la antena dipolo de media longitud de onda), la cual estaba formada por dos antenas telescópicas que fueron adquiridas junto con la SDR. En la Figura 13 se puede ver el kit de antena completo adquirido junto con la SDR.



Figura 13: Kit antena dipolo. Fuente: (Amazon, 2021b).

La antena dipolo de media longitud de onda o $\lambda/2$, está formada por dos elementos conductores rectilíneos colineales de igual longitud (el radio de grosor es mucho menor que la longitud), y que están alimentados en el centro (Rico Secades, 2010). Para calcular la longitud total del dipolo, se introduce en la fórmula: $150/\text{frecuencia de trabajo (MHz)} = \text{longitud del dipolo en metros}$. Debido a que las ondas no se comportan igual en el espacio libre que en el material conductor, se aplica un factor de reducción conocido como factor de velocidad (K), que depende del material utilizado. Para nuestra antena, por utilizar un cable coaxial de alimentación, el factor de velocidad toma el valor de 0,95. De tal manera que la fórmula quedaría de la siguiente forma: $142,5/\text{frecuencia de trabajo} = \text{longitud real del dipolo en metros}$ (Serres, 2012).

3.1.2. Ordenador: Raspberry Pi 3 Model B+.

En 2009, bajo el seno de la tendencia cultural “Maker Movement”⁷, nació en Inglaterra la Raspberry Pi Foundation, una organización caritativa con el objetivo de enseñar informática a la gente joven. Hoy en día cuenta con una comunidad muy grande de la que se nutre para poder mejorar en el campo de la educación. Ofrecen ordenadores con un gran rendimiento y con un tamaño muy reducido (del tamaño de una tarjeta de crédito), al alcance de la gran mayoría por su bajo coste (Raspberry Pi Foundation, 2021a).

^{7 7} Es una tendencia cultural que valora la capacidad individual de cada uno de hacer las cosas por si solos mediante herramientas como impresoras 3D o CAD software. Su origen se atribuye al auge de los “Makerspaces”, centros comunitarios donde los creadores (“Makers”), tienen acceso a herramientas que serían inaccesibles o inasequibles por distintos motivos. (Cole, 2014).



Los distintos modelos de Raspberry Pi no dejan de ser ordenadores completamente funcionales que cuentan con distintas especificaciones en función del objetivo y uso que se le va a dar. Por ejemplo, la Raspberry Pi Zero Family sería la gama baja, y cuenta con prestaciones básicas, mientras que la Raspberry Pi 4 Model B (el modelo más nuevo hasta la fecha), cuenta con unas prestaciones más elevadas que la anterior. A pesar de las claras diferencias entre los modelos, todos tienen en común que son compatibles, es decir, todo el *software* que este escrito en la memoria de un modelo, correría en otro modelo, sin importar de si es de una gama más baja o más elevada (Halfacree, 2020).

Al igual que cualquier ordenador, la Raspberry Pi está hecha por diversos componentes, y cada uno realiza diferentes actividades para que el sistema en conjunto funcione. No está dentro de los objetivos del trabajo describir cuales son las distintas partes de la Raspberry Pi y cómo funcionan, pero si cabe mencionar que cuenta con tecnología System on a Chip (SoC). Los ordenadores convencionales, disponen de un circuito integrado que se encuentra impreso en la placa base, que se ocupa de controlar el flujo de datos entre la placa base con los demás componentes (la CPU, la RAM, los dispositivos de almacenamiento y los periféricos). Este circuito impreso se conoce como *chipset*, y determina la compatibilidad entre todos los componentes del ordenador, ya que, si el procesador o cualquier otro componente no es capaz de comunicarse con el *chipset*, sería imposible enviar o recibir información a través de la placa base (Knerl, 2021). Actualmente, existen dos tipos de *chipset*, el puente norte⁸, y el puente sur⁹, ambos con distintos fines (GuilleVen, 2021).

La tecnología SoC consigue integrar el *chipset*, el procesador, la tarjeta gráfica (GPU, del inglés Graphics Processing Unit), la RAM y demás componentes en un solo *chip* de silicio. De esta manera, se logra de manera considerable reducir el tamaño del dispositivo, así como una reducción en el consumo de energía al reducir en gran medida el cableado. Es por esta serie de características, que se utilice en gran medida en dispositivos móviles, como por ejemplo los microprocesadores Qualcomm Snapdragon. En la Figura 14 podemos ver el último modelo de microprocesador Qualcomm Snapdragon a fecha de edición del trabajo.



Figura 14: Microprocesador Qualcomm Snapdragon 888 5G. **Fuente:** (Maturana, 2020).

A pesar de estas ventajas, entre sus inconvenientes destaca un aumento del calor que genera al tener todos los componentes colocados a una distancia muy próxima, pudiendo influir de manera significativa en el rendimiento (Intel, 2021).

Para el desarrollo de la carga de pago, se ha utilizado en concreto la Raspberry Pi 3 Model B+, la cual se puede observar en la Figura 15. Tanto las especificaciones técnicas como sus dimensiones se pueden encontrar en los Anexos VII y VIII.

⁸ Conecta el microprocesador con la memoria RAM, a su vez se encuentra conectado al puente sur.

⁹ Conecta el microprocesador con los periféricos.



Figura 15: Raspberry Pi 3 Model B+. **Fuente:** (*Raspberry Pi Foundation, 2021b*).

Además del ordenador, se adquirió una carcasa protectora Joy-It “Block Active” que protegiese la Raspberry Pi frente a golpes y del calor. Dispone de dos ventiladores y de disipadores de calor. En la Figura 16 se puede ver la carcasa junto con la Raspberry Pi.



Figura 16: Carcasa protectora Joy-It junto con la Raspberry Pi 3 Model B+. **Fuente:** (*JOY-IT, 2021*).

3.1.3. Dron: Yuneec Typhoon H plus.

El fabricante del dron que se ha utilizado para realizar el proyecto es Yuneec International, una empresa que se dedica a fabricar aeronaves desde 1999, con sede en Jinxi (Provincia de Jiansu, China). En sus orígenes, la empresa se dedicaba a fabricar aeronaves controladas por control remoto para aficionados, pero pronto se dieron cuenta de la gran capacidad que podrían ofrecer sus drones y decidieron especializarse en el diseño de aeronaves destinadas a un ámbito más profesional, como por ejemplo para inspecciones, búsqueda y rescate, seguridad, fotografía, vídeo, construcciones, etc (YUNEEC US, 2021). Actualmente comercializan con modelos de UAV hexacópteros como el Typhoon H3, Typhoon H plus (utilizado en la memoria) y el H 520E; pero también con cuadricópteros como el Legacy. Además de drones, también ofrecen la posibilidad de adquirir cargas de pago (solo cámaras), baterías y accesorios (YUNEEC International, 2021a).

El Typhoon H Plus, que se puede observar en la Figura 17. Es un dron que cuenta de serie con una cámara de 1 in (Pulgada) sobre *gimbal*, que es una plataforma estabilizadora motorizada, que le permite grabar vídeos con una calidad de resolución 4K. Este modelo de dron ofrece la posibilidad de utilizar la tecnología Intel® RealSense™, que le permite esquivar obstáculos automáticamente. Esto se consigue gracias a que se construye un modelo 3D del espacio por el que sobrevuela, con lo que consigue calcular rutas alrededor de obstáculos. Esta tecnología es capaz de recordar la posición de los obstáculos, mejorando su capacidad de evitarlos. El dron cuenta con dos configuraciones: la profesional y la avanzada. La profesional cuenta con la tecnología Intel® RealSense (YUNEEC International, 2021c)™, y la avanzada añade a la profesional dos sensores ultrasónicos para mejorar la capacidad de esquivar obstáculos. La unidad de control remoto utiliza el sistema operativo Android™ y funciona en la banda de trabajo de 5.8GHz WiFi (del inglés, Wireless Fidelity), permitiendo un alcance máximo de 1,6 Km (en condiciones óptimas). También cuenta con seis modos inteligentes de vuelo automático: Orbit me, Point of interest, Journey mode, Follow Me / Watch me, Curve cable cam y Return home. Las especificaciones técnicas del dron pueden consultarse en el Anexo V.



Figura 17: Yuneec Typhoon H plus. **Fuente:** (YUNEEC International, 2021b).

3.1.4. Impresora 3D: Artillery Sidewinder X1.

La impresión 3D (Tres Dimensiones) es una tecnología emergente, que consiste en fabricar objetos físicos a partir de un archivo de modelado digital. Para conseguir este resultado, esta tecnología construye añadiendo capa sobre capa de un material hasta completarlo. Para que el proceso de fabricación sea lo más eficiente posible, se deben configurar de forma sincronizada tanto el *hardware* (impresora 3D), como el *software* de impresión (Roberson, 2021).

Muchos son los ámbitos que se benefician de la impresión 3D: industria, medicina, construcción, aeroespacial y automoción, industria alimentaria, arte, etc. Entre las ventajas principales que ofrece, cabe mencionar la reducción del coste en la fabricación, ya que, por norma general, el precio de fabricación es proporcional a la complejidad del objeto, sin embargo, mediante la impresión 3D, los objetos complejos son igual de costosos que los más simples. Además, no hace falta el ensamblaje de las piezas, pudiéndose añadir al proceso de impresión, las distintas piezas que unen los objetos. Otro valor añadido son las posibilidades ilimitadas de creación, a lo que hay que sumar páginas como Thingiverse, que conforman bibliotecas de archivos de modelado 3D realizados por la comunidad (Lipson and Kurman, 2014)(Medina Hidalgo, 2021) (Ortiz gil, 2019).

Existen diferentes tipos de impresión 3D y de materiales, pero concretamente se definen el modelo de impresión 3D empleado por la Artillery Sidewinder X1, la cuál es la que se ha empleado en el trabajo, y que se puede observar en la Figura 18.



Figura 18. Artillery Sidewinder X1. **Fuente:** (Tienda oficial Artillery3D, 2021).

La técnica de impresión utilizada por esta impresora 3D se denomina modelado por deposición fundida (FDM, del inglés Fused Deposition Modeling) o fabricación por filamento fundido (FFF, del inglés Fusion Filament Fabrication), y consiste en depositar el material, previamente calentado y en forma de hilos, por capas. Al terminar una capa, el extrusor¹⁰ se eleva una altura y vuelve a repetir el proceso.

¹⁰ Es la parte de la impresora 3D que se encarga de tirar, arrastrar, y colocar el material de impresión 3D.



3.1.5. Material de impresión: ácido poliláctico.

El material empleado por la impresora 3D es un plástico, en concreto el ácido poliláctico (PLA, del inglés PolyLactic Acid), que se trata de un biopolímero termoplástico, precursor del ácido láctico. Se genera a través de la fermentación de carbohidratos, como por ejemplo la glucosa, que se puede obtener del almidón de maíz, la yuca o la caña de azúcar. Su temperatura de fusión no es muy alta, varía entre los 60°C y los 125°C, al contrario que con su rival, el ABS (del inglés Acrylonitrile Butadiene Styrene) (230°C). El material es biodegradable en condiciones normales¹¹, los hongos y bacterias del medio son capaces biodegradar el polímero (Serna C., Rodríguez de S. and Albán A., 2003). En la Figura 19 se pueden ver unos rollos de hilo de PLA.



Figura 19: Rollos de hilos de PLA. Fuente: (Contreras Howard, 2019)

3.1.6. Soporte de la carga de pago.

Para el correcto anclaje de la carga de pago de EW al dron, se tuvo que diseñar un soporte mediante diseño asistido por computadora (CAD, del inglés Computer Aided Design), que posteriormente fue impreso. El diseño del soporte se hizo con ayuda de la página Thingiverse, una web donde la comunidad crea y publica archivos STL sin fines lucrativos, desde donde se pudo descargar un archivo STL con medidas acordes al soporte deslizante del dron (Uptowndisco, 2016). Por lo tanto, solo se tuvo que diseñar desde cero la parte correspondiente a almacenar la batería portátil, la Raspberry Pi 3 y el soporte de agarre. Para todas las piezas se ha procurado realizar un rallado general, consiguiendo ahorrar material a la hora de imprimir todas las piezas.

En la Figura 20 se puede ver la página principal de la web Thingiverse.

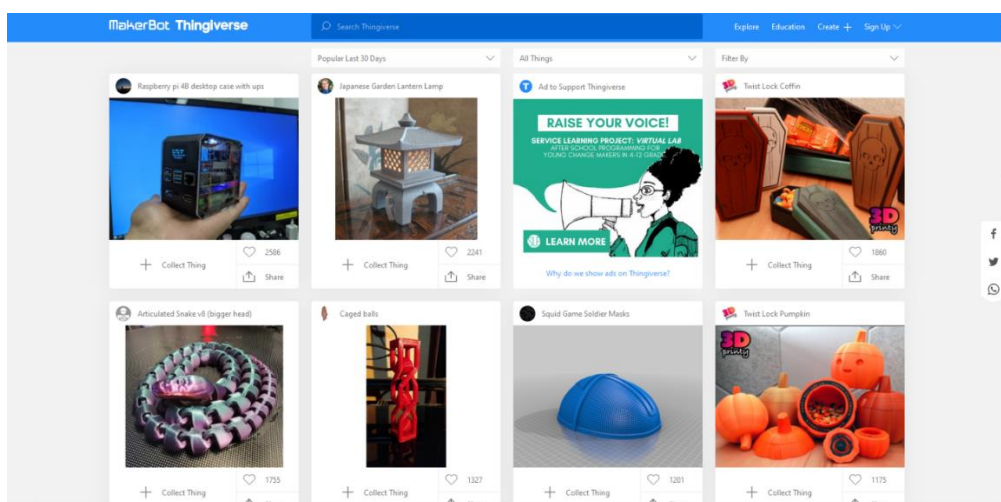


Figura 20: Página web de Thingiverse. Fuente: (Thingiverse, 2021).

Una vez conseguido el hardware de la carga de pago que se necesitaba anclar (batería portátil y Raspberry Pi), se dispuso a tomar las medidas oportunas para poder diseñar la pieza principal, la caja de la carga de pago. En la Figura 21 podemos ver dicha pieza en una fotografía 3D. La zona de

¹¹ Presencia de microorganismos, oxígeno, nutrientes, minerales y unas temperaturas entre los 20°C y los 60°C.



almacenamiento de la batería portátil (parte superior) lo único que tiene que comentar es que uno de los lados se encontraba abierto, ya que el puerto de alimentación se encontraba ahí. La zona de almacenamiento de la Raspberry Pi (parte inferior) tiene la peculiaridad de tener unos huecos, expresamente diseñados para las tomas de entrada y salida que se han utilizado: 4 puertos USB, un puerto RJ45, puerto de alimentación y puerto HDMI. Además, cuenta con un rayado que coincide con la zona de ventilación de la carcasa de la Raspberry Pi, de tal forma que permita expulsar el aire caliente por dicho rallado. En la parte superior de la caja de la carga de pago se pueden ver unos raíles, que corresponden a unos raíles extraídos de un diseño perteneciente a un *gimbal* de cámara de la página *Thingiverse*. En la Figura 22 se puede ver la pieza en la página de *Thingiverse*.



Figura 21: Caja de la carga de pago. **Fuente:** Elaboración propia.

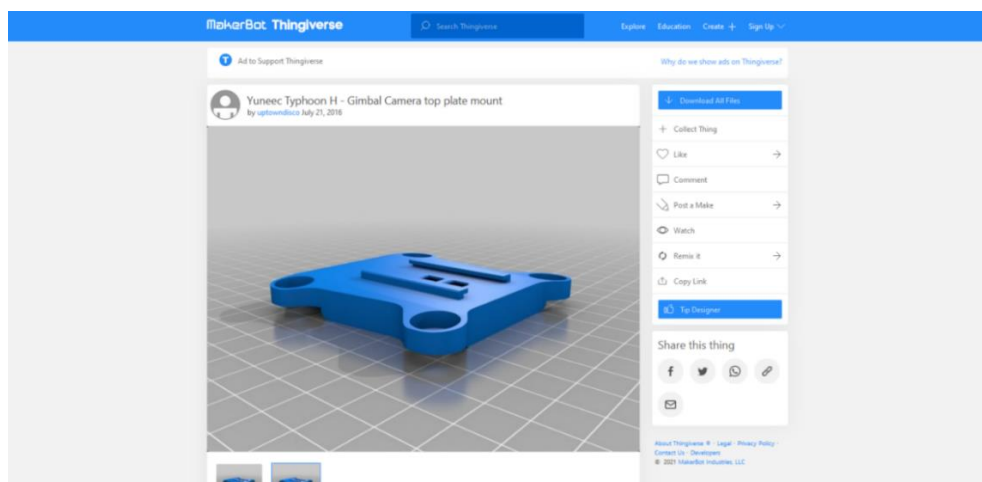


Figura 22: Gimbal de cámara en Thingiverse. **Fuente:** (Uptowndisco, 2016).

Las tapas de la caja de la carga de pago, que se aprecian en las Figuras 23 y 24, se diseñaron para pegarse a la caja una vez introducidos tanto la batería portátil como la Raspberry Pi, de tal forma que se pudiera asegurar que ambas partes se mantuvieran dentro de la caja durante el vuelo del dron.



Figura 23: Tapa de la zona de almacenamiento de la batería externa. **Fuente:** Elaboración propia.



Figura 24: Tapa de la zona de almacenamiento de la Raspberry Pi 3 Model B+. **Fuente:** Elaboración propia.

Debido a las patas que tiene el dron para posarse en el suelo, se pensó en diseñar un soporte de agarre para la carga de pago (Figura 25), de tal forma que se pudiera anclar cualquier tipo de carga de pago, sin importar si por sus dimensiones, dicha carga chocaba con las patas del dron. Gracias a esta pieza, añadimos modularidad al poder incluir distintas cargas de pago reutilizando esta pieza.

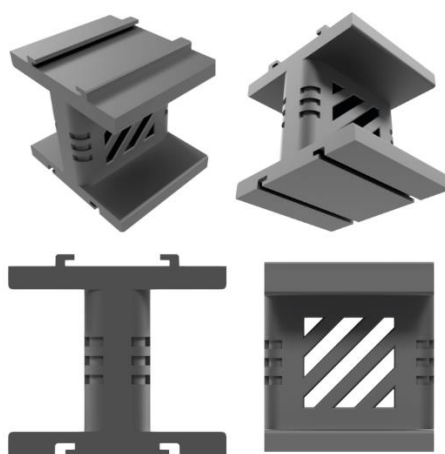


Figura 25: Soporte de agarre de la carga de pago. **Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 26 se ilustra el conjunto de todas las piezas.



Figura 26: Conjunto del soporte de la carga de pago. **Fuente:** Elaboración propia.

Los planos de todas las piezas pueden consultarse en el Anexo X.



3.1.7. Antena WiFi: Aqprox APPUSB26AC.

Para aumentar la distancia de conexión entre la carga de pago y la estación en tierra, se ha utilizado un adaptador USB Wireless de doble banda (2,4 Y 5 GHz) Aqprox APPUSB26AC (Figura 27), que dispone de una antena con una ganancia máxima de 26 dBi (AQPROX communications, 2021b).



Figura 27: Dual Band High Power Wireless USB External Adapter. **Fuente:** (PcComponentes, 2021).

Dicha antena se conectó al PC, puesto que, debido a su tamaño, era preferible colocarlo en tierra y no en la carga de pago. Para su uso se requirió instalar unos *drivers* que venían con la propia antena en un disquete. Una vez instalados en el PC, no se requirió ningún tipo de configuración, por lo que la instalación fue sencilla y simple.

La ficha técnica de la antena se puede consultar en el Anexo XI.

3.1.8. Receptor GPS con salida USB: VK-162 GMOUSE.

Para dotar a la carga de pago de capacidad para conocer su posicionamiento, se le incorporó un dongle receptor de señal GPS con una salida USB para poder conectarlo a uno de los puertos USB de la Raspberry Pi. El modelo en concreto que se utilizó es el VK-162 GMOUSE, que se ilustra en la Figura 28.



Figura 28: Receptor GPS con salida USB: VK-162 GMOUSE. **Fuente:** (Electropeak, 2021).

Este receptor es ideal para la carga de pago, puesto que además de tener un tamaño y peso adecuado, es compatible con el sistema operativo instalado en la Raspberry Pi (Ubuntu). Lo único que se tuvo que hacer fue instalar unos *drivers* en la Raspberry Pi para poder utilizarlo. Los *drivers* se instalaron mediante la terminal de comandos, indicando el *link* de descarga de los *drivers*. Para su posterior uso con el *software* propio de la SDR, cabe destacar que utiliza por defecto, el protocolo de GPS NMEA 0183.

NMEA 0183 es un estándar de interfaz que define requerimientos de señales eléctricas, el protocolo de transmisión de datos y tiempo, y sentencias específicas. Lo que pretende este protocolo es soportar la transmisión de datos en serie de una sola vía desde un solo transmisor, a uno o más receptores (National Marine Electronics Association, 2021).

Las especificaciones técnicas del VK-162 GMOUSE se pueden consultar en el Anexo XII.



3.1.9. Batería externa: POWERADD Pilot X7.

Para alimentar a la carga de pago durante el vuelo del dron, se utilizó una batería externa de 20000 mAh de la marca POWERADD y modelo Pilot X7, que pertenecía al autor del trabajo. En la Figura 29 se puede ver una foto de la batería externa.



Figura 29: Batería externa POWERADD Pilot X7. **Fuente:** (Lloret, 2018).

Las especificaciones técnicas de dicha batería pueden consultarse en el Anexo XIII.

3.2. Software.

En este apartado se va a describir y explicar el *software* utilizado para el desarrollo e instalación de la carga de pago de EW.

3.2.1 Sistema operativo: Ubuntu.

El Sistema Operativo (SO) es el *software* básico que se encarga de gestionar los recursos del sistema (*hardware* y aplicaciones) y presentarlos al usuario. Además, proporciona una interfaz con la que interactuar. Existen distintos tipos de SO que ofrecen distintas capacidades, en función del uso que se le va a dar al equipo. En la Figura 30 se ilustra de forma esquematizada las interacciones entre el SO y el resto de los elementos que conforman el sistema informático

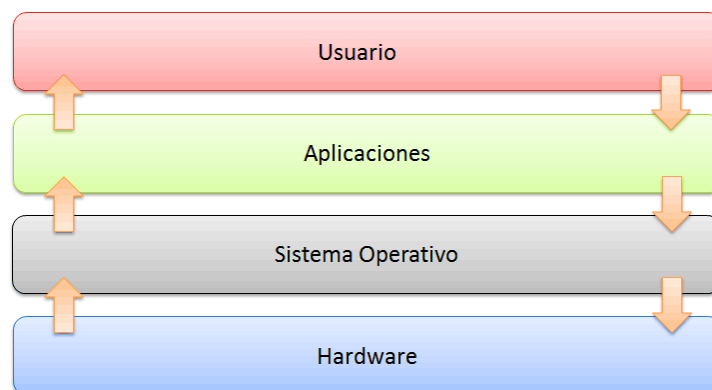


Figura 30: Esquema que muestra la interacción entre el SO y las distintas partes que conforman el sistema informático. **Fuente:** (Sol Llaven, 2015).

En torno a la década de los 80, Richard Stallman creó la Free Software Foundation (FSF), y poco después se consiguió desarrollar GNU/Linux¹², un SO de *software* libre de tipo Unix. *Software* libre hace referencia a que el código fuente está siempre disponible al usuario, para ser vendido, regalado o modificado. En cuanto a Unix, es un *software* propietario de la compañía AT&T, que nació en la década de los 70. Se utiliza principalmente en sistemas servidores, donde predominan los comandos sobre la interfaz gráfica. En la Figura 31 se ilustra el logotipo del sistema operativo GNU/Linux.

¹² GNU es el entorno y Linux es el núcleo o kernel del SO

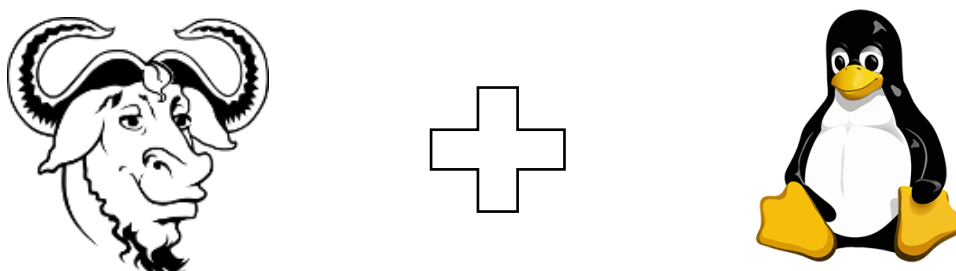


Figura 31: GNU + Linux. Fuente: (Free Software Foundation, 2021; Red Hat, 2021).

GNU/Linux está reglamentado por la GNU General Public License (GNU Org., 2007). Las sucesivas actualizaciones se realizan por un grupo no estructurado de programadores de todo el mundo, que se encuentran conectados a través de Internet. Las versiones se numeran bajo la numeración X.Y.Z., siendo las versiones estables, aquellas con una “Y” par, mientras que las que tienen una “Y” impar, son versiones en desarrollo. A pesar de que estas versiones en desarrollo pueden contener errores, al liberarse junto con la versión el código fuente, los errores se llegan a subsanar en cuestión de horas gracias a los cientos de personas que descargan, prueban y leen el código fuente. De esta manera se consigue tener un SO de una calidad muy alta, en ocasiones con menos errores que otros SO de propietarios y a un coste cero (Grupo de Usuarios de Software Libre de Córdoba, 2021) (Stallman, 2020).

Para la carga de pago, se ha utilizado el SO Ubuntu¹³ Desktop para arquitecturas AMD64¹⁴, puesto que el procesador de la Raspberry Pi 3 Model B+ utiliza esta arquitectura, por lo que el SO será más eficiente para esa versión. Ubuntu es una distribución de GNU/Linux basada en Debian, lo que quiere decir que están formadas GNU/Linux (Debian en concreto) y un conjunto de aplicaciones determinadas. Otras distribuciones de GNU/Linux son Fedora, Debian, etc.

Este SO es de software libre y pertenece a la iniciativa “open source” (del inglés, código abierto). Una de las ventajas que ofrece Ubuntu frente a otros SO, es la poca necesidad de recursos que tiene para su funcionamiento. Si que es verdad que con respecto a Windows 10, las diferencias son prácticamente nulas, pero para poder ejecutar la mayor parte de los programas propios de la SDR, se necesitaba una distribución de GNU/Linux para poder ejecutarlos (Mako Hill *et al.*, 2010).

3.2.2. Software propio de radio definida por *software*.

El primero a explicar será SDR Sharp, uno de los *softwares* más populares, gratuitos y compatibles con todos los *dongles* RTL SDR. Esta desarrollado por la empresa Airspy, que se dedica a la fabricación de SDR. El programa básico cuenta con un gestor de frecuencias, una grabadora, reductores de ruido digital y un *waterfall*. Sin embargo, el programa es modular, ya que se le pueden añadir *plugins* desarrollados por terceros, que son complementos que se añaden a las aplicaciones para agregarles funciones nuevas, como por ejemplo demoduladores de Terrestrial Trunked Radio (TETRA), un estándar abierto de radio digital, centrado en establecer comunicaciones críticas en el ámbito de la seguridad pública y las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad (FFCCSE). En el Anexo XIII se muestran las Figuras 75 y 76, donde se pueden ver las capturas de pantallas tomadas en el programa, sin *plugins* (Figura 75) y con *plugins* (Figura 76).

El segundo programa utilizado se llama RTLSDR Scanner, un analizador de espectro de banda ancha para *dongles* RTL SDR. Además de otras funciones, permite realizar mapas en los que se puede ver la potencia de la señal (conocidos como mapas de calor), mediante la combinación del movimiento de la SDR junto con las coordenadas GPS. Es un programa totalmente gratuito desarrollado por EarToEarOak (EarToEarOak, 2015b). Su descarga se realiza a través de la página GitHub una biblioteca de código en la que la comunidad sube a la nube sus códigos para uso y disfrute del resto (EarToEarOak,

¹³ La palabra Ubuntu es una palabra común en diferentes lenguas de Sudáfrica, que se refiere a la unión y el apoyo entre una comunidad de personas.

¹⁴ AMD64 es una arquitectura de procesadores x64 *bits*, propietaria de la compañía AMD, que sigue el estándar de arquitectura x86 (legacy), compatible con x16 y x32 *bits* (AMD, 2005).



2015a). En el Anexo XIII se muestra en la Figura 63 una captura de pantalla del programa RTLSDR Scanner.

3.2.3. Software de escritorio remoto: VNC Viewer.

VNC Viewer es un *software* de código libre de tipo cliente servidor desarrollado por la empresa RealVNC, que permite acceder al dispositivo desde cualquier ubicación de forma remota (tanto conexión inalámbrica como cableada) sin cifrar la conexión. Está basado en el protocolo Remote Frame Buffer (RFB), un protocolo sencillo de acceso remoto a interfaces gráficas de usuario. Se compone de dos actores, el cliente RFB o visualizador y el servidor RFB (Richardson, 2010), como podemos observar en la Figura 32 de forma esquemática.

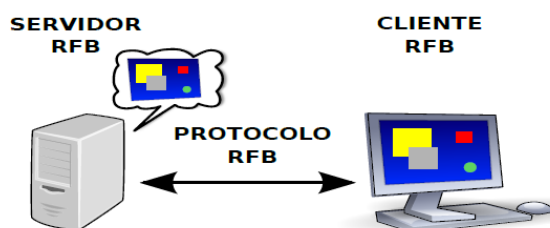


Figura 32: Esquema de funcionamiento del protocolo RFB. Fuente: (Richardson, 2010).

Para poder hacer uso de este programa, ambos programas deben tener instalados el programa y uno de los dispositivos se tiene que configurar como servidor, en nuestro caso fue la carga de pago, que era a la que queríamos acceder remotamente (Soto, 2021). Una vez configurada como servidor, se abre el programa en el cliente y se introducen los datos necesarios para acceder al escritorio remoto: dirección IP y puerto abierto para realizar la conexión, en formato “direcciónIP:puerto”. En la Figura 33 podemos ver una captura de pantalla del programa junto con los parámetros de conexión requeridos.

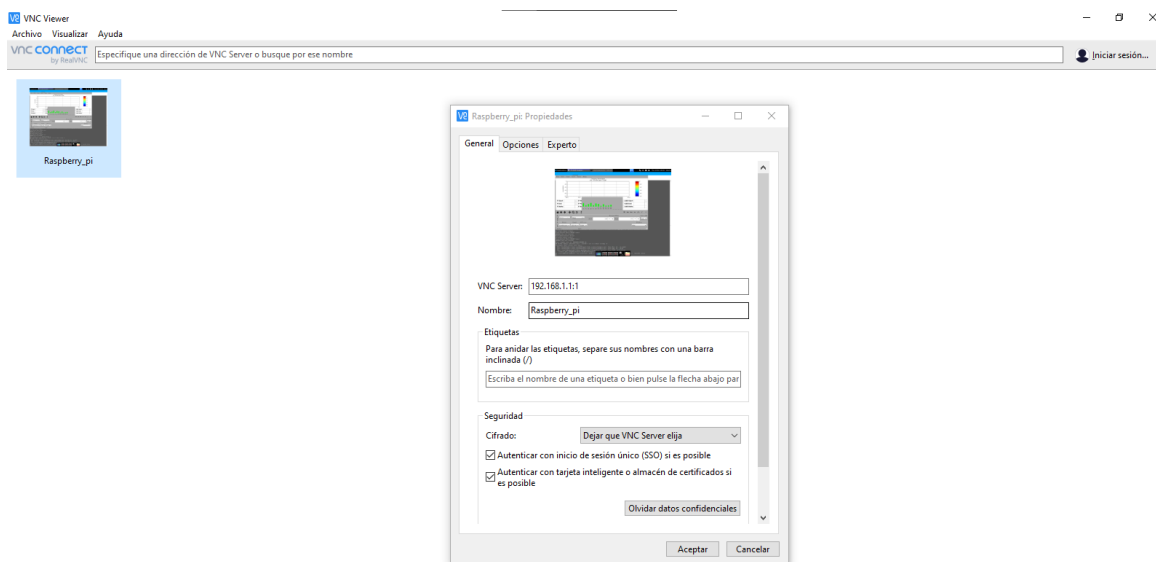


Figura 33: Captura de pantalla de VNC Viewer en la que se puede observar los parámetros de conexión con la carga de pago. Fuente: Elaboración propia.

3.2.4. Software de diseño asistido por computadora: Autodesk Inventor.

Autodesk Inventor es un *software* propietario de CAD, desarrollado por la empresa Autodesk. Está diseñado específicamente para diseños de productos, y permite realizar diseños paramétricos de piezas, además de ensamblajes, simulación y más funciones (NKE, 2021). La ventaja que ofrecen los diseños paramétricos es que, una vez acabado el modelado, las medidas se recogen en variables y el programa establece las relaciones entre dichas variables para el objeto modelado. En caso de que se quisiera modificar alguna medida, no haría falta volver a empezar, ya que es el programa quien se encarga de actualizar el resto de las medidas. En cuanto a los ensamblajes y simulaciones, quiere decir que el programa permite unir piezas y simular como funcionarían en conjunto.



Dado que el autor del trabajo, disponía de licencia, se utilizó este programa para diseñar el soporte de la carga de pago. En la Figura 34 se muestra una captura de pantalla de la página principal de Autodesk Inventor con la pieza de la carcasa principal de la carga de pago.

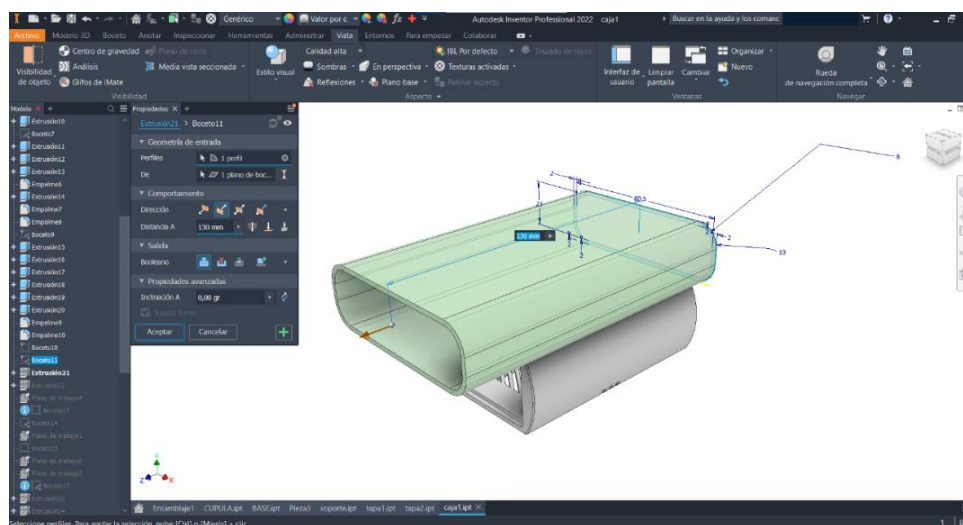


Figura 34: Captura de pantalla de Autodesk Inventor con la pieza de la carcasa principal de la carga de pago. **Fuente:** Elaboración propia.

Tanto los planos del soporte de la carga de pago, mostrados en el Anexo X, como las Figuras 21, 23, 24, 25 y 26 también se han obtenido a partir de este programa.

3.2.5. Software de impresión 3D: Cura

Para la impresión del soporte, también se necesitaba hacer uso de un *software* de corte o laminador, que para el proyecto fue Cura, de la empresa Ultimaker. Es un *software* libre (código abierto), muy extendido a nivel mundial. Este tipo de *software* permite la modificación de algunos parámetros de impresión, como por ejemplo el tipo de filamento utilizado. Lo que hace principalmente el *software* es generar, a partir de nuestro archivo de modelado digital, un archivo G-Code, que contiene la información necesaria que necesitan las distintas partes de la impresora 3D: extrusor, cabezal, base, etc, proporcionándole a la impresora 3D todos los datos necesarios para imprimir el objeto (Marchante, 2020) (Ultimaker, 2021).

En la Figura 35 se puede ver una captura de pantalla de la página principal de Cura con el archivo STL de la carcasa principal de la carga de pago cargado en el programa.

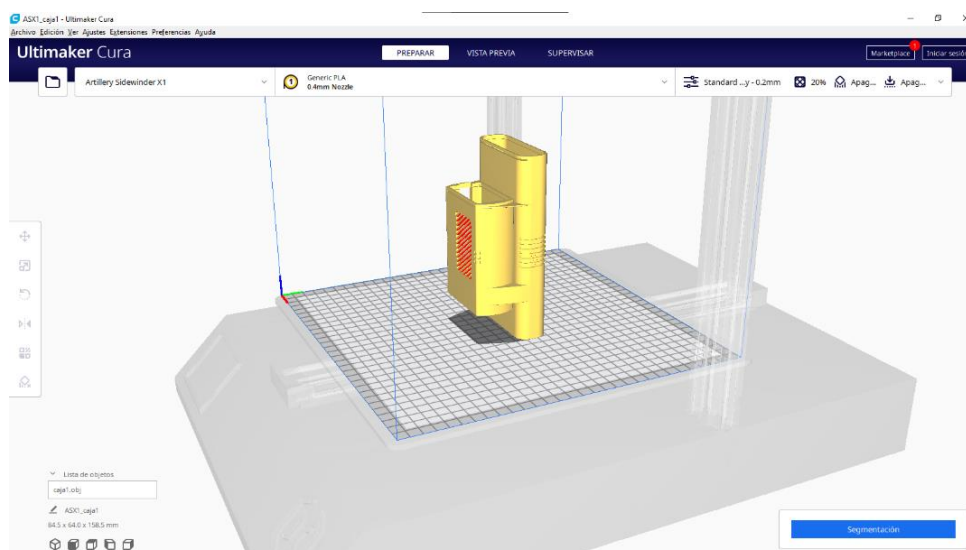


Figura 35: Captura de pantalla de Cura con el archivo STL de la carcasa principal de la carga de pago. **Fuente:** Elaboración propia.



3.3 Sistema completo y funcionamiento.

En este apartado se va a explicar cómo funciona el sistema completo para poder acceder a la carga de pago.

Una vez preparado el *hardware* implicado y configurado el *software* que se va a utilizar, lo único que haría falta sería asegurarse de que se puede acceder a la carga de pago remotamente, y que los programas cargados funcionan correctamente. En la Figura 36, podemos ver de forma esquematizada como se accede de forma remota a la carga de pago.

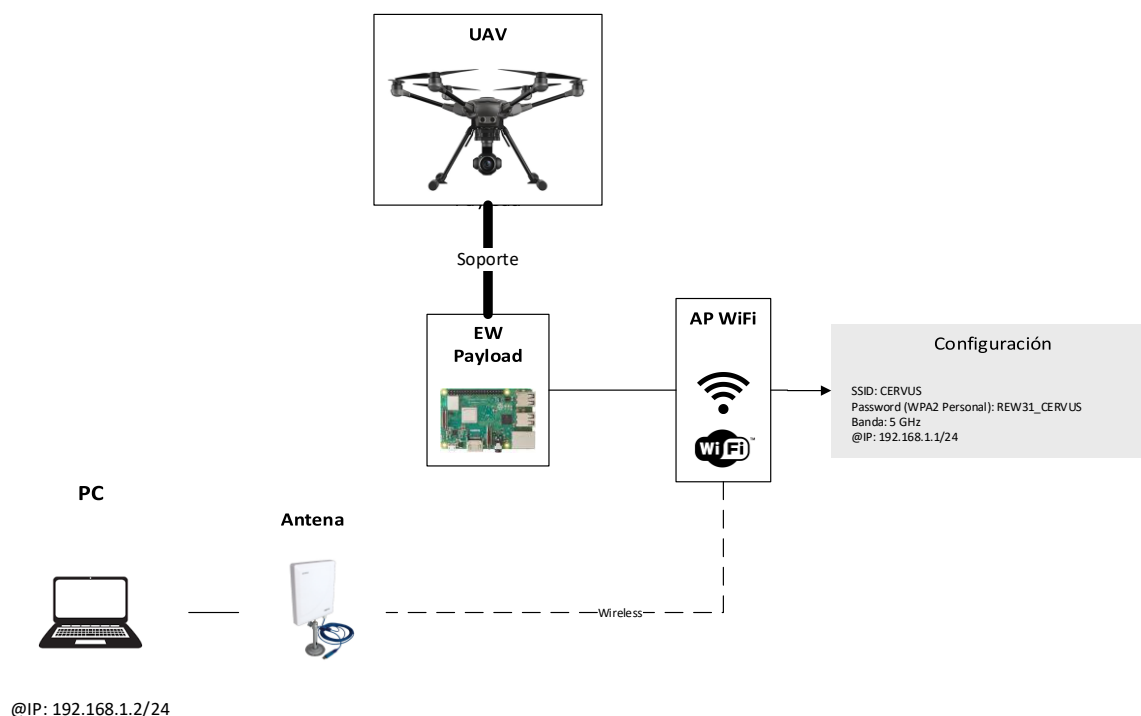


Figura 36: Esquema del sistema de comunicación de la carga de pago. **Fuente:** Elaboración propia.

El Punto de Acceso (PA) o *hotspot* WiFi se debe configurar antes de montar todo el sistema, mediante la interfaz gráfica de Ubuntu. Para ello, se conecta la Raspberry Pi a un monitor, un teclado y un ratón. Después, lo único que hace falta es configurar el PA con la configuración mostrada en las Figuras 37, 38, 39 y 40. El estándar WiFi que se está utilizando es el 802.11 ac, que trabaja en las bandas de 2,4 GHz y 5 GHz. Es muy recomendable no hacer coincidir la banda de frecuencias del mando a control remoto del dron, con la del PA WiFi. Para nuestro caso se utiliza la banda de 5 GHz (Configuración en la Figura 37), debido a que el mando control remoto del dron funciona en la banda de 2,4 GHz. Ciertamente es que, al utilizar la banda de 5 GHz, la tasa de transmisión de datos aumenta y la distancia de conexión en el enlace disminuye, pero de esta manera se evita cualquier tipo de interferencia entre el mando a control remoto del dron y el PA WiFi. También se desactiva el servidor DHCP (opcional), que asigna direcciones IP de forma automática a los clientes. Al desactivar este protocolo, el PA toma como dirección propia la primera dirección IP disponible para la red establecida, en nuestro caso la dirección IP 192.168.1.1/24 (Configuración en la Figura 39). En la Figura 40 se muestra la configuración que debe tener el PA para activarse desde el momento en que se inicie la Raspberry Pi. El identificador de la red o SSID es "CERVUS" y como contraseña se establece "REW31_CERVUS", protegida por cifrado WPA2 Personal (Configuración en la Figura 38).

WPA es un estándar de cifrado que protege el acceso a los datos en redes inalámbricas (Rios, 2011). Existen dos versiones de WPA2: la personal y la empresarial. WPA2 personal está destinada al uso doméstico, mientras que WPA2 Empresarial se utiliza a nivel de empresa, como su nombre indica. WPA2 utiliza como cifrado el estándar AES, un esquema de cifrado de datos por bloques que utiliza una estrategia de red de sustitución-permutación. Como método de autenticación, WPA2 utiliza PSK, un método que requiere introducir una única clave que es compartida por todos los equipos que se encuentran en la red (Hernández Chacón, 2010).

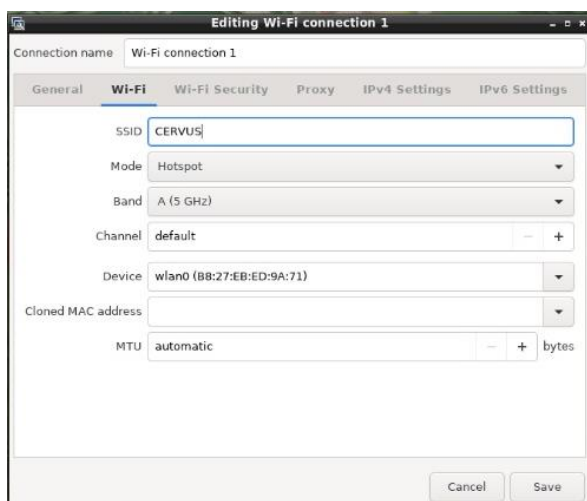


Figura 37 (Izquierda): Configuración de la SSID y banda de trabajo del PA en la interfaz gráfica de Ubuntu. **Fuente:** Elaboración propia.

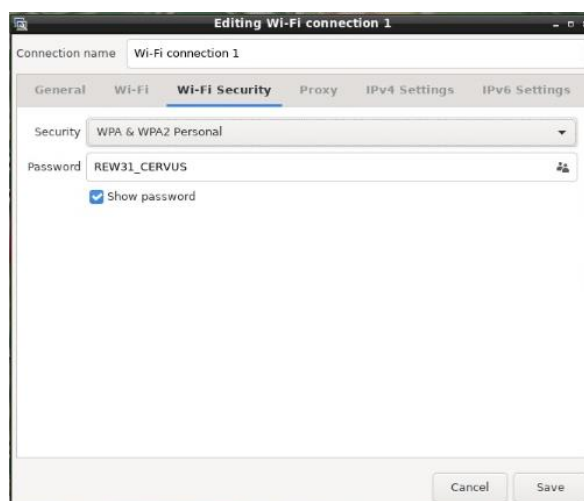


Figura 38 (Derecha): Configuración de la contraseña del PA en la interfaz gráfica de Ubuntu. **Fuente:** Elaboración propia.

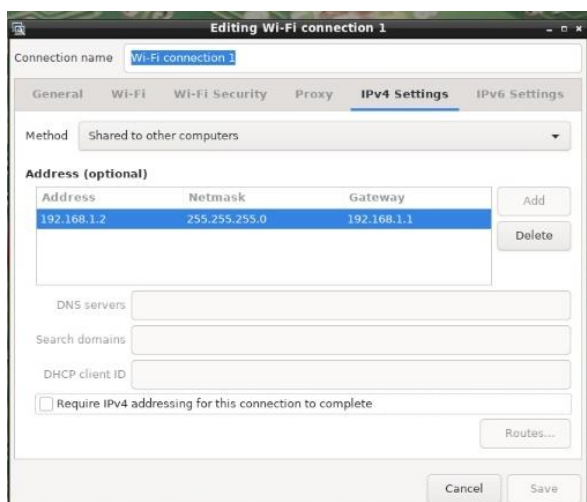


Figura 39 (Izquierda): Configuración de las direcciones IP asignadas por el PA en la interfaz gráfica de Ubuntu. **Fuente:** Elaboración propia.

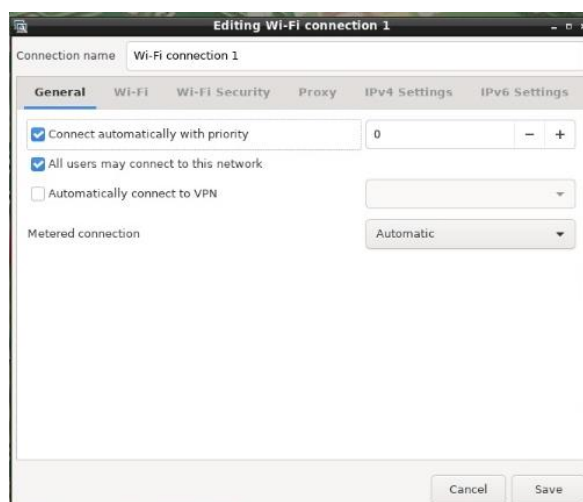


Figura 40 (Derecha): Configuración para activar el PA automáticamente con el arranque en la interfaz gráfica de Ubuntu. **Fuente:** Elaboración propia.

Una vez se encuentra el PA configurado a priori, ya se puede acceder de forma remota a la carga de pago. Para conectarse, lo único que hace falta que hacer es asignar al adaptador de LAN inalámbrica WiFi del PC la dirección IP 192.168.1.2/24 de forma manual, que es la única dirección que permite el PA, según se ha configurado. En la Figura 41 se puede ver como se asigna manualmente la dirección IP de la tarjeta de red del PC. Para finalizar la conexión, lo único que falta es conectar el PC a la WiFi CERVUS e introducir la contraseña “REW31_CERVUS” para acceder.

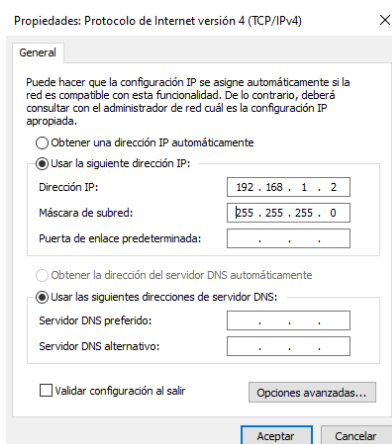


Figura 41: Captura de pantalla de la configuración manual de la dirección IP del adaptador de LAN inalámbrica Wifi en el PC (Windows 10). **Fuente:** Elaboración propia.

Para comprobar que la conexión es estable, se introduce en la consola de mandos de Windows del PC el comando “ping -t”, que es un comando que utiliza el protocolo ICMP, que envía de forma continua paquetes de datos de 32 bytes de tamaño. Gracias a este comando podemos comprobar con tan solo mirar la consola si la conexión es estable, ya que este comando comprueba que la capa física (incluido medio físico hasta destino), acceso al medio (tarjetas de red) y red (configuración IP) son correctas. Si los paquetes enviados no llegan al destino, se debe comprobar el sistema de conexión, ya que, en función del mensaje mostrado en pantalla, el motivo puede ser uno u otro. Por ejemplo, si nos aparece el mensaje “Request timed out” (del inglés, tiempo de espera agotado para esta solicitud) al hacer un *ping*, significa que se conoce el camino que debe recorrer el paquete hasta llegar al destino, pero que el *host* puede estar apagado o mal configurado, o simplemente esa dirección IP no está todavía asignada (Ortín Gracia, 2021a). En la Figura 42, se muestra una captura de pantalla de la consola de comandos de Windows de PC en donde se aprecia como los paquetes de datos no llegan debido a que se estaba conectando el PC a la carga de pago por conexión WiFi, hasta que llega un momento en el que la conexión se establece y comienzan a llegar los pings.



Figura 42: Comprobación de la conexión Wifi mediante el comando “ping -t”. **Fuente:** Elaboración propia.

Comprobado que el enlace se mantiene estable, ya se puede acceder remotamente a la carga de pago. Para poder acceder a la terminal de comandos de la carga de pago de manera rápida y sencilla para hacer cualquier tipo de cambio acerca de la configuración, no hace falta utilizar el escritorio remoto. Mediante el protocolo SSH (Secure SHell), que es un protocolo de acceso remoto entre dos dispositivos que crea una conexión cifrada entre la máquina que hace de servidor (carga de pago), y el ordenador cliente. Al estar la conexión entre ambos equipos cifrada, imposibilita que cualquier persona ajena a la red, pueda acceder a la contraseña o a cualquier tipo de información que se envíe por el canal (Bonet



Esteban, 2013). En la Figura 43 se muestra cómo se ingresa a la consola de comandos mediante el protocolo SSH, ingresando el comando “ssh user@direcciónIP”, que para nuestro caso fue “ssh ubuntu@192.168.1.1”, y después introduciendo la contraseña de acceso “password: pi” (la contraseña no se muestra al escribirla en la consola). Tanto el nombre de usuario como la contraseña eran conocidos, ya que esos parámetros se configuraron previamente en la carga de pago. El comando “sudo” (SUPERuser DO), nos da permisos para ejecutar cualquier tipo de comando en la terminal, y si le añadimos la coletilla “-i”, se guarda el comando para todas las órdenes siguientes. Todos estos pasos se pueden ver en la Figura 43.

```
root@ubuntu:~#
Microsoft Windows [Versión 10.0.19043.1288]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\JORGE>ping 192.168.1.1

Haciendo ping a 192.168.1.1 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.1.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.1: bytes=32 tiempo<1m TTL=64

Estadísticas de ping para 192.168.1.1:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
            (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
        Mínimo = 0ms, Máximo = 0ms, Media = 0ms

C:\Users\JORGE>ssh ubuntu@192.168.1.1
ubuntu@192.168.1.1's password:
Welcome to Ubuntu 20.04.3 LTS (GNU/Linux 5.4.0-1043-raspi aarch64)

 * Documentation:  https://help.ubuntu.com
 * Management:    https://landscape.canonical.com
 * Support:        https://ubuntu.com/advantage

Last login: Thu Oct 14 00:34:34 2021 from 192.168.1.2
ubuntu@ubuntu:~$ sudo -i
root@ubuntu:~#
```

Figura 43: Acceso a la consola de comandos de la carga de pago mediante SSH y activación de permisos de superusuario. **Fuente:** Elaboración propia.

Para acceder al escritorio remoto de la carga de pago, primeramente, tenemos que activar el puerto por el que se va a realizar la conexión, que lo establece el comando “vncserver”, como podemos ver en la Figura 44, que nos establece el 1 como número de puerto.

```
root@ubuntu:~#
C:\Users\JORGE>ssh ubuntu@192.168.1.1
ubuntu@192.168.1.1's password:
Welcome to Ubuntu 20.04.3 LTS (GNU/Linux 5.4.0-1043-raspi aarch64)

 * Documentation:  https://help.ubuntu.com
 * Management:    https://landscape.canonical.com
 * Support:        https://ubuntu.com/advantage

Last login: Thu Oct 14 00:39:38 2021 from 192.168.1.2
ubuntu@ubuntu:~$ sudo -i
root@ubuntu:~# vncserver

You will require a password to access your desktops.

Password:
Verify:
Would you like to enter a view-only password (y/n)? y
Password:
Verify:
xauth: file /root/.Xauthority does not exist

New 'X' desktop is ubuntu:1

Creating default startup script /root/.vnc/xstartup
Starting applications specified in /root/.vnc/xstartup
Log file is /root/.vnc/ubuntu:1.log

root@ubuntu:~#
```

Figura 44: Activación de puerto de la aplicación VNC Viewer mediante el comando “vncserver”. **Fuente:** Elaboración propia.

Una vez se encuentra el puerto levantado, solo hay que acceder a la aplicación VNC Viewer e introducir los parámetros de conexión adecuados, como se puede ver en la Figura 33. Antes de conectarse al escritorio remoto, el propio programa nos avisa que la conexión no está cifrada, como se ve en la Figura 45. Al establecerse la conexión, el escritorio remoto de VNC Viewer tiene la forma que se aprecia en la Figura 46.

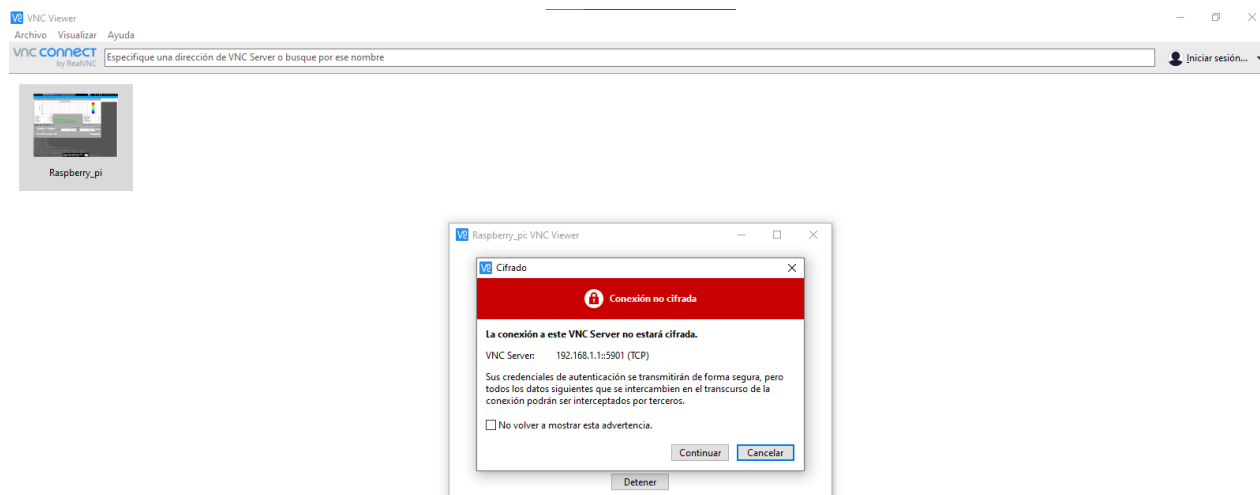


Figura 45: Aviso de conexión no cifrada en VNC Viewer. **Fuente:** Elaboración propia.

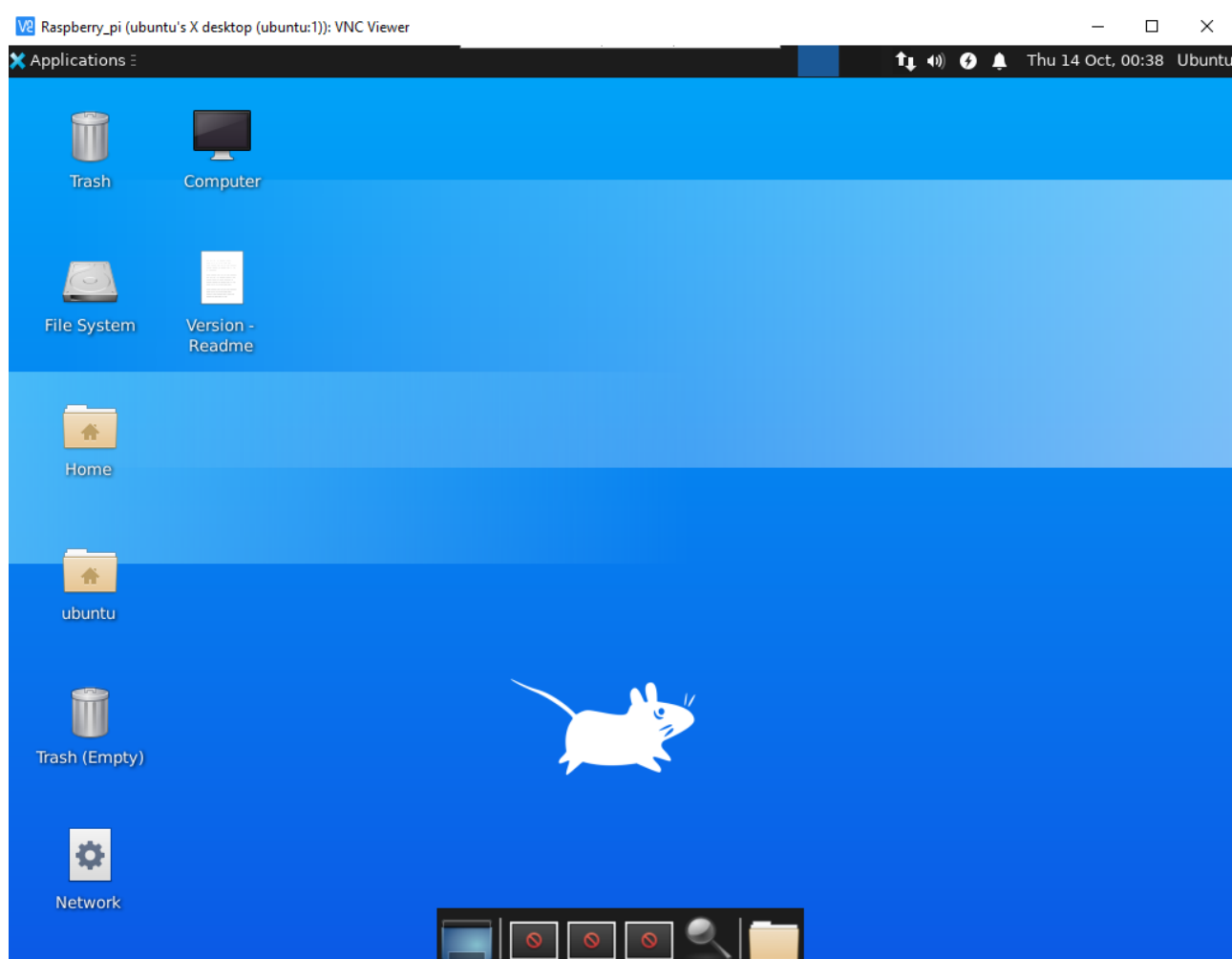
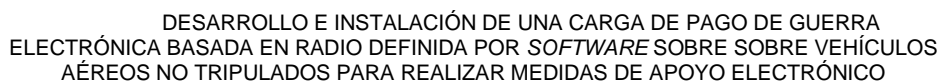


Figura 46: Escritorio remoto de VNC Viewer. **Fuente:** Elaboración propia.

El programa RTLSDR Scanner necesita hacer uso del escritorio remoto para su funcionamiento. En la Figura 47 se pueden ver los comandos utilizados para activar el programa. Primero se utiliza el comando "ls", para que se muestre en pantalla el contenido del directorio¹⁵. Después, mediante el protocolo "cd rtl-sdr", nos cambiamos al directorio "rtl-sdr". Una vez dentro de ese directorio, ejecutando el comando "Python -m rtlcdr_scanner", se iniciaba el programa, el cual se puede ver en la Figura 48.

¹⁵ Los archivos que están resaltados en color azul son carpetas



Jorge Astorga Ybarra

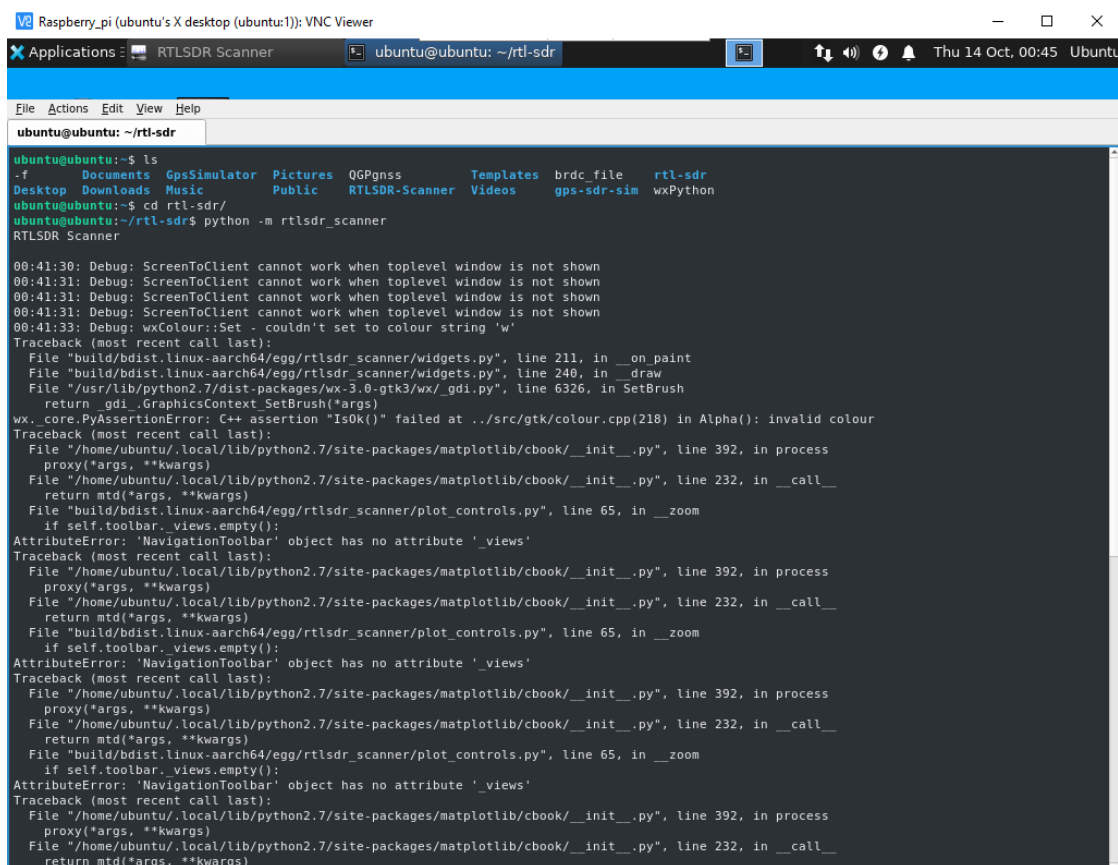


Figura 47: Comandos utilizados para abrir el programa RTLSDR Scanner en VNC Viewer. **Fuente:** Elaboración propia.

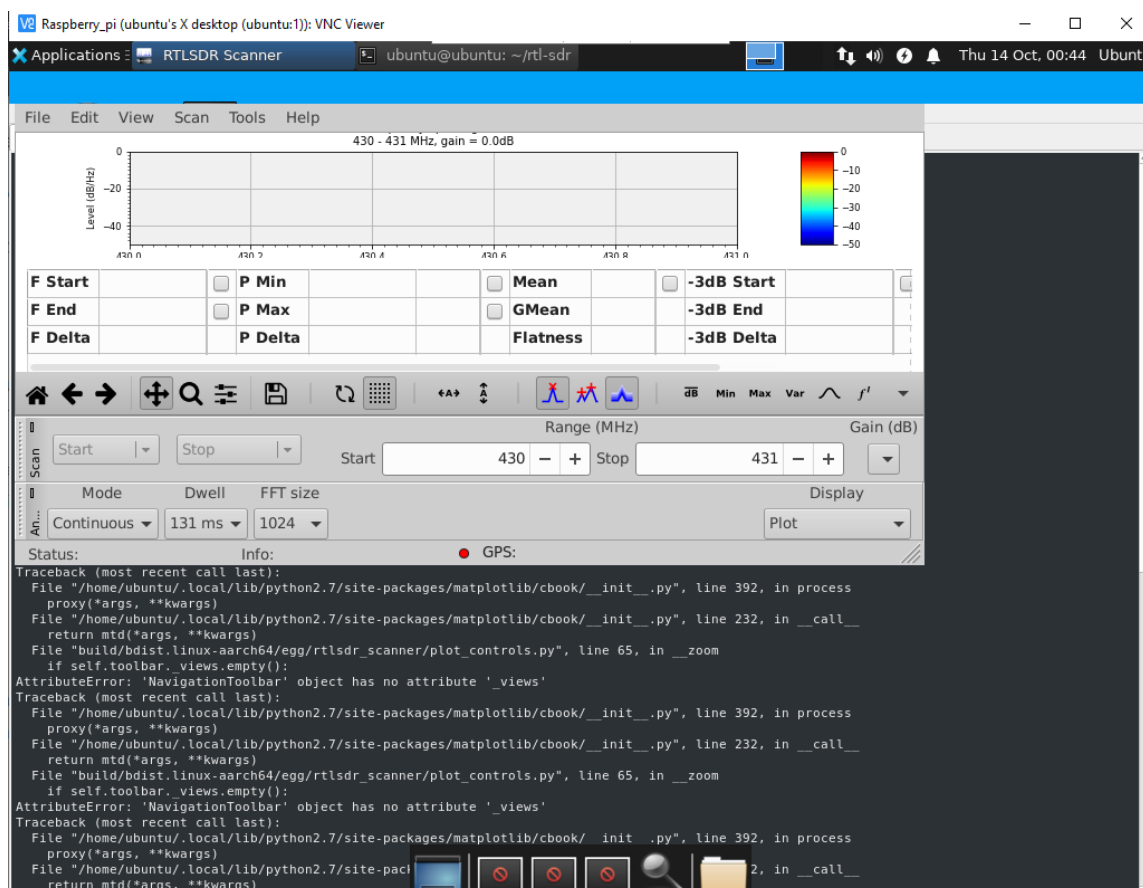


Figura 48: Ventana del programa RTLSDR Scanner en VNC Viewer. **Fuente:** Elaboración propia.



Al contrario que RTLSDR Scanner, SDR Sharp, solo necesita acceder mediante el protocolo TCP (Transmission Control Protocol) a la SDR por la consola de comandos del PC. Mediante este protocolo que está orientado a la conexión, se garantiza una conexión punto a punto fiable, ya que la entrega de los paquetes de datos es en orden y sin pérdidas entre pares de procesos. Además es un servicio full-duplex, lo que quiere decir que el flujo de datos es bidireccional simultáneo sobre una conexión (Ortín Gracia, 2021b). En la Figura 49, se puede ver como introduciendo el comando “rtl_tcp -a direcciónIP” dentro de la terminal de la carga de pago (terminal remota), para nuestro caso “rtl_tcp -a 192.168.1.1”, accedemos por TCP a la SDR. Posteriormente, en el programa SDR Sharp, se selecciona como fuente, la RTL-SDR por TCP, y se configuran los parámetros de conexión como se muestra en la Figura 50.

```
ubuntu@ubuntu:~$ ssh ubuntu@192.168.1.1
Microsoft Windows [Versión 10.0.19043.1288]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\JORGE>ssh ubuntu@192.168.1.1
ubuntu@192.168.1.1's password:
Welcome to Ubuntu 20.04.3 LTS (GNU/Linux 5.4.0-1043-raspi aarch64)

 * Documentation:  https://help.ubuntu.com
 * Management:    https://landscape.canonical.com
 * Support:        https://ubuntu.com/advantage

Last login: Thu Oct 14 02:06:56 2021 from 192.168.1.2
ubuntu@ubuntu:~$ rtl_tcp -a 192.168.1.1
Found 1 device(s):
 0: Realtek, RTL2838UHIDIR, SN: 00000001

Using device 0: Generic RTL2832U OEM
Found Rafael Micro R820T tuner
[R82XX] PLL not locked!
Tuned to 1000000000 Hz.
Listening...
Use the device argument 'rtl_tcp:192.168.1.1:1234' in OsmoSDR (gr-osmosdr) source
to receive samples in GRCC and control rtl_tcp parameters (frequency, gain, ...).
```

Figura 49: Conexión TCP con la SDR. Fuente: Elaboración propia.

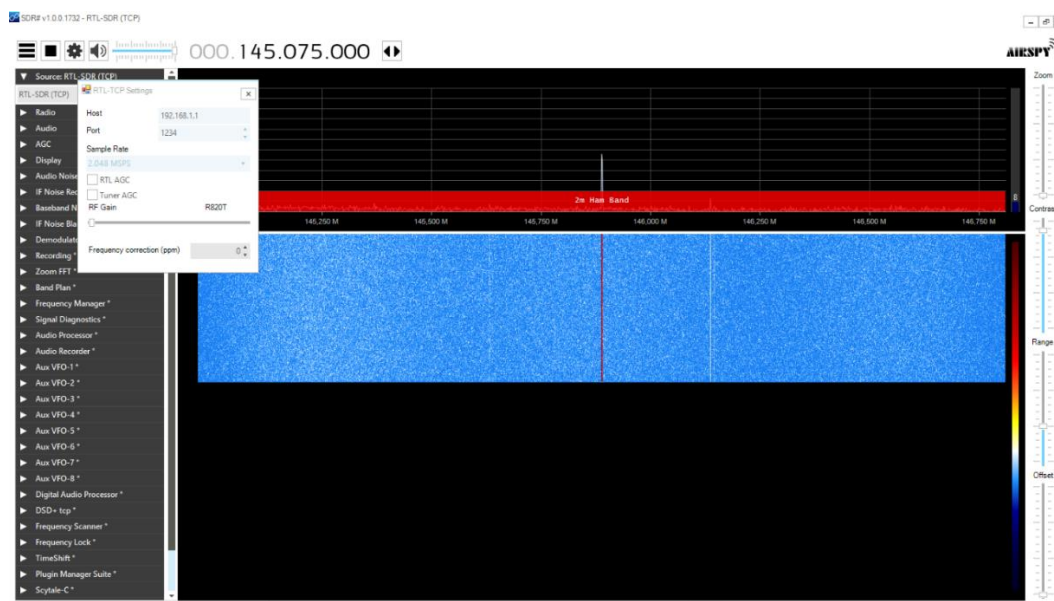


Figura 50: Configuración de los parámetros de la fuente en SDR Sharp para utilizar la SDR por conexión TCP. Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que el sistema funciona correctamente, hay que tener en cuenta que el trabajo debe ser de aplicación para el REW31. Debido a que el sistema de comunicación con la carga de pago está basado en WiFi, dicho sistema emite radiación EM al medio, que puede ser detectada por el enemigo, además de que la conexión puede ser fácilmente perturbada o simplemente se puede acceder a los datos enviados consiguiendo descifrar los datos. Es por estas dos razones, por las que el sistema definido, no sería de gran utilidad para la unidad. Como se comentó en el apartado de motivación, actualmente se está buscando dentro del proyecto CERVUS el desarrollo e implementación de una carga de pago de EW. Al contar la estación CERVUS con un dron cautivo, la carga de pago que se ha desarrollado para el trabajo se debería modificar en algunos aspectos, como por ejemplo el soporte si se utiliza otro tipo de dron o en el sistema de conexión, para poder ser explotada por los operadores de la estación, ya que en este sistema, el flujo de datos viaja por el cable del dron cautivo, salvando el problema que presenta el prototipo, mejorando la seguridad al reducir su firma electromagnética y dificultando el acceso a los datos.



4. ANÁLISIS Y RESULTADOS DE ACCIONES DE VIGILANCIA ELECTRÓNICA MEDIANTE RADIO DEFINIDA POR *SOFTWARE* SOBRE VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO.

En este apartado se van a describir y explicar dos pruebas realizadas con la carga de pago para demostrar su viabilidad. El objetivo principal de estas pruebas no fue explotar el potencial del *software* empleado, ya que esta tarea sería del personal que operase la carga de pago, sino emplear el programa RTLSDR Scanner y el programa SDR Sharp con *plugins* con dos pruebas sencillas para demostrar su potencial y correcto funcionamiento.

4.1 Mapa de calor de señales electromagnéticas.

Los mapas de calor son una forma de representación de los datos recogidos sobre un área determinada. Se basan en representar mediante colores, los distintos valores recogidos de una magnitud sobre la zona de estudio. Normalmente los colores más fríos representan valores menores, mientras que los más cálidos, representan los valores mayores. Para poder generar un mapa de calor, además de conocer el valor de la variable en un punto, se necesita conocer su posición en el mapa (Castillo Prieto, 2016). Es una herramienta muy visual que se puso de moda durante la pandemia, con los famosos mapas de calor que representaban la incidencia del coronavirus por comunidades autónomas en nuestro país. De hecho, dos investigadores de la universidad de Alcalá, crearon una aplicación totalmente pública que mostraba este tipo de mapas interactivos sobre la evolución del COVID-19 en todo el mundo (Bachiller, 2020).

Para realizar el mapa de calor, se colocaron dos *Walkie-talkie* (transmisor-receptor portátil) analógicos Baofeng UV-5R, separados uno del otro, transmitiendo a 439 MHz. Una vez colocados y transmitiendo, se lanzó el dron con la carga de pago, con el programa RTLSDR Scanner configurado para realizar un escaneo de frecuencias entre 438 MHz y 440 MHz. Pasados cinco minutos desde el inicio de la prueba, se hizo regresar el dron para recoger el archivo generado por el programa.

Una de las ventajas de RTLSDR Scanner es que el archivo generado puede superponerse sobre imágenes de Google Earth, lo cual hace mucho más simple y visual el resultado. En la Figura 51, se observa el mapa de calor, donde se puede ver como la zona donde hizo el escaneo de frecuencias el dron es toda la zona coloreada. También se muestra con un círculo negro, las zonas donde se colocaron los transmisores, lo cual concuerda perfectamente, ya que las zonas “más calientes” o con un color más cálido, son las zonas cercanas a los transmisores, mientras que las zonas “más frías” o con un color más frío, son las zonas más alejadas de los transmisores.

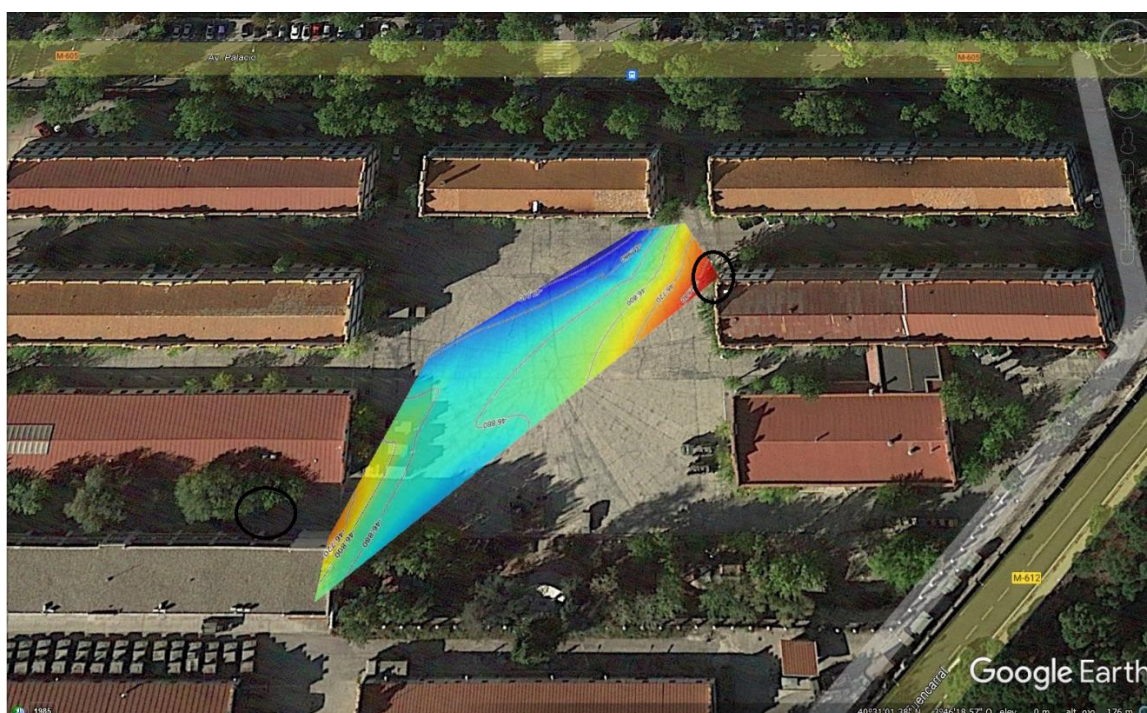


Figura 51: Mapa de calor para dos transmisores analógicos a 439 MHz. Fuente: Elaboración propia.



4.2 Variación de la potencia en recepción de señales analógicas en función de la altura.

Esta prueba consistía en emplear el *plugin* “Signal diagnostics” de SDR Sharp para comprobar la potencia recibida en la SDR para una señal EM. Como elemento de verificación de que los datos mostrados por el programa eran correctos, se contrastaron los resultados recogidos experimentales con unos datos obtenidos por el programa Radio Mobile.

Radio Mobile es un *software* gratuito que se utiliza para el cálculo de radioenlaces. Para sus predicciones, utiliza información digital del terreno y aplica un modelo matemático para simular las transmisiones, ya sean entre dos o más puntos que pueden estar fijos o móviles. La información digital del terreno se nutre de tres bases de datos que se encuentran en un servidor: características del terreno, elevación y densidad poblacional. Existen dos versiones, la *freeware* y la *online*. La versión *freeware* es mucho más compleja y potente que la versión *online* (*Información de Radio Mobile Online*, 2021). Para nuestra pequeña prueba se ha utilizado la versión *online*. La página principal de la versión *online* de Radio Mobile se puede ver en el Anexo XVI.

Para realizar las dos pruebas, se utilizaron dos *Walkie-talkie*. Uno de ellos fue el Motorola DP4400, y el otro el Baofeng UV-5R. El transmisor Baofeng es analógico, pero el Motorola es un transmisor digital que sigue el estándar DMR, un estándar internacional de radio digital desarrollado por el instituto de estándares de telecomunicaciones europeo (ETSI, del inglés European Telecommunications Standards Institute). Este estándar busca reemplazar a la radio analógica y a otros estándares digitales, como por ejemplo TETRA (DMR, 2021). Los transmisores se pueden ver en la Figura 52, y sus especificaciones técnicas en el Anexo XVI.



Figura 52: Transmisor digital tipo DMR Motorola DP4400 (Derecha) y analógico Baofeng UV-5R (Izquierda). **Fuente:** (Amazon, 2021a; Tecnitrán Telecomunicaciones, 2021).

Las pruebas consistían en utilizar dos frecuencias distintas de cada transmisor y ver como variaba la potencia de recepción en la carga de pago en función de la altura. Las alturas a las que se tomaron las mediciones empezaban en 10 m sobre el suelo, y una vez se realizaba la medición, se añadían otros 10 m de altura, hasta llegar a los 100 m. Los resultados tanto experimentales, como los obtenidos en la simulación de Radio Mobile se pueden consultar en el Anexo XVII. Para ver los parámetros introducidos en el programa Radio Mobile para obtener las simulaciones, consultar el Anexo XVI.

Obtenidas las mediciones y las simulaciones, los datos se han graficado para una mejor interpretación de los mismos. Estas gráficas se pueden ver en el Anexo XVIII, aunque a continuación se muestra una copia de la Figura, que pertenece a la prueba de potencia realizada con el transmisor analógico Baofeng UV-5R a 144 MHz. Para representar los datos se ha utilizado el programa MATLAB Online, que es un programa de cálculo que se utiliza mucho en el ámbito de la ingeniería y de la matemática aplicada. Permite realizar cálculos numéricos con vectores y matrices, además de poder manejar polinomios, funciones, ecuaciones diferenciales ordinarias, gráficos, etc. (Casado Fernández, 2021). Cuenta con una interfaz que funciona mediante comandos propios, ya que MATLAB en sí es un entorno y lenguaje de programación. Los resultados de los scripts que se crean se muestran en ventanas independientes. Lo que hace único a MATLAB es su potente capacidad gráfica (Benítez and Hueso, 2016).

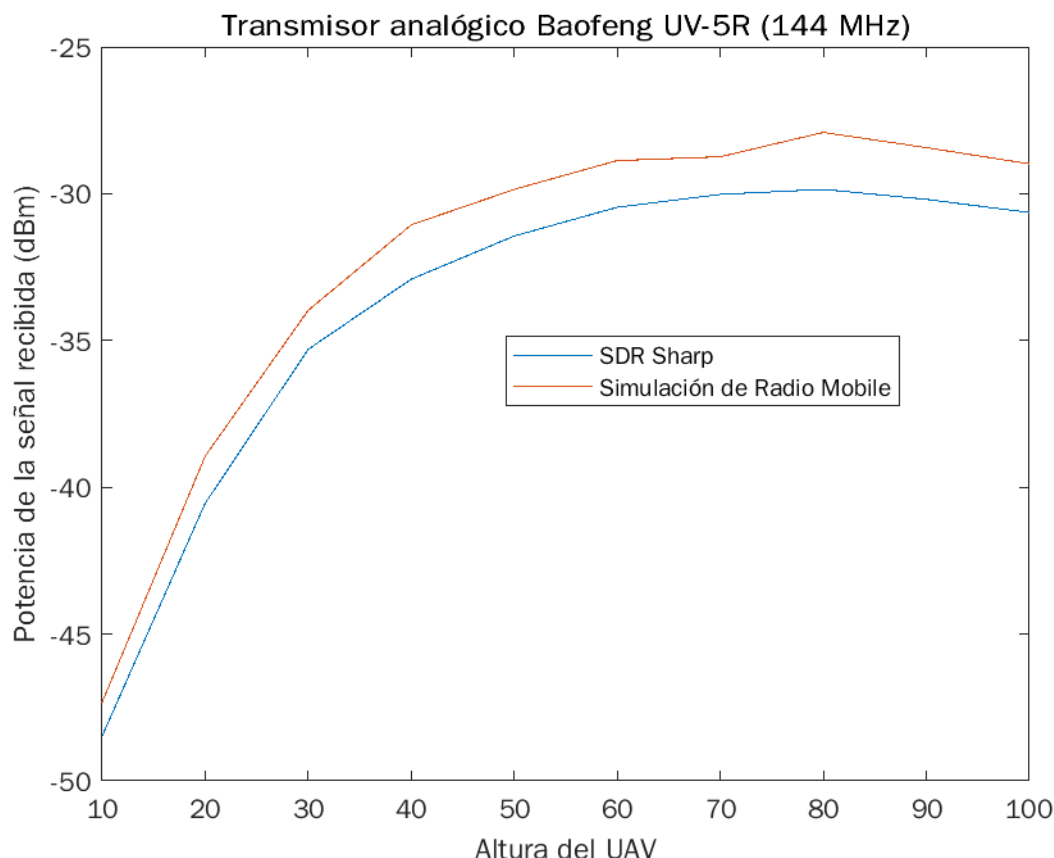


Figura 85 (Copia): Prueba de potencia con el transmisor analógico Baofeng UV-5R a 144 MHz. **Fuente:** Elaboración propia.

Si observamos todas las gráficas del Anexo XVIII, podemos ver como todas las mediciones con SDR Sharp se encuentran por debajo de las simulaciones obtenidas con Radio Mobile, es decir, que las potencias de la señal en recepción para las simulaciones son mayores que para el caso real. Esto se debe a que la simulación se ha calculado sobre un entorno ideal, en el que no se han considerado pérdidas en la línea, ni del transmisor ni del receptor. Además, gran parte de los datos han sido redondeados, como por ejemplo las ganancias de las antenas, ya que no se disponía de su valor exacto.

También se puede ver como al aumentar la frecuencia de trabajo del transmisor, disminuye la potencia en recepción, ya que por normal general, a mayor frecuencia, menor alcance, y la señal se hace más sensible a cualquier obstáculo del terreno (Castillo Castillo, 2018).

Finalmente, en vista de los resultados obtenidos, dada la pequeña diferencia que hay entre los resultados de la simulación con el programa Radio Mobile, y los resultados recogidos experimentalmente con el *plugin* "Signal diagnostics" de SDR Sharp, se puede determinar que tanto el programa SDR Sharp junto con el *plugin*, como la SDR, funcionan correctamente, o lo que es lo mismo, que la integración del *hardware* y el *software* en la carga de pago ha sido satisfactoria.



5. CONCLUSIONES

En vistas de los resultados obtenidos, se puede concluir que el desarrollo e instalación de una carga de pago de EW para realizar ESM ha sido todo un éxito. La propia carga estaría en disposición de ser explotada por un operador que pudiera exprimir al máximo todo su potencial.

Es verdad que la carga es un prototipo y que su capacidad es muy limitada, dado que los componentes utilizados no son los mejores. Por ejemplo, se podría haber utilizado un *hardware* más potente, como una SDR de gama más alta, o una Raspberry Pi 4, que tiene mayores prestaciones que la Raspberry Pi 3 B+. Además, este tipo de carga de pago cobraría gran sentido en drones tipo cautivo, como el dron del proyecto CERVUS, del que podría conseguir una alimentación de corriente constante, alargando en gran medida la vida útil de la carga de pago, pudiendo recabar muchísima más información, sin la limitación del tiempo de descarga de la batería portátil, aunque podría ser bastante interesante contemplar ambos sistemas de alimentación, para tener la oportunidad de poder lanzar el dron en misiones avanzadas.

En cuanto al *software*, también se podría utilizar *software* propietario, pero las licencias suelen tener precios muy elevados, que, en determinados casos, puede llegar a ser una mejor opción emplear el dinero en mejorar la parte física. Cabe destacar que todo el *software* era libre y de código abierto, lo que implica que cualquier persona puede acceder a él si dispone de una conexión a *internet*. Esto nos hace pensar que cualquier persona con los adecuados conocimientos técnicos, podría realizar los mismos pasos que se ha realizado en el trabajo, pero sin unos fines académicos. De esta manera, se demuestra la gran inseguridad en la sociedad en la que vivimos en materia de telecomunicaciones.

Respecto al sistema de comunicación entre la estación en tierra (PC) y el dron, lo óptimo y mas seguro sería que fuese una comunicación cableada en lugar de una comunicación inalámbrica, ya que, de esta forma, se reduce en gran medida la emisión de ondas EM al medio. Aún mejor sería si el sistema de cableado tuviera protección *Tempest*. Las emisiones *Tempest* se conocen como “emisiones comprometidas” o “emisiones no intencionadas”, y son el conjunto de emisiones procedentes de un sistema de información, de las cuales se puede obtener información orientada a inteligencia, que pueda comprometer la seguridad nacional de un país. Estas emisiones pueden ser de diferentes tipos, pero en nuestro caso, estas señales serían EM, provenientes de las interfaces de comunicaciones y de los equipos (Valles Castro, 2014). En caso de que solo se pudiera utilizar un sistema inalámbrico, se debería minimizar el margen de cobertura al necesario y cifrar la comunicación, para que, en el caso de ser detectada, dificultar la fuga de información.

En cualquier caso, este prototipo ha servido para demostrar la gran cantidad de acciones que se pueden realizar con una carga de pago con un presupuesto muy reducido. Ahora, dejo en manos de las empresas del sector defensa, ofrecer a las unidades de EW del ET, una carga de pago con un mayor rendimiento y que este acorde a sus necesidades operativas.

Líneas futuras

La EW, al igual que las telecomunicaciones militares, son todavía un concepto muy reciente. Desde la aparición de la primera comunicación en el campo de batalla, nació con ella la EW, con el objetivo de degradar las comunicaciones enemigas y obtener información que pudiese ser de utilidad. A partir de entonces, la EW no ha cesado de evolucionar tecnológicamente, ya que cada vez que se hacía algún avance en telecomunicaciones, se trataba de lograr la superioridad electromagnética con su homónimo de EW.

Cada vez más, los ejércitos le están dando más importancia a la EW, incorporando en sus vehículos cualquier tipo de dispositivos que ofrezca ventajas electromagnéticas como por ejemplo los inhibidores que se utilizaron en Afganistán para proporcionar una burbuja de protección electromagnética que protegiese a los convoyes de posibles detonaciones remotas de IED. Esto es solo un pequeño ejemplo reciente de como la EW se va haciendo hueco en las unidades militares.

Aún más reciente es la incorporación de cargas de pago de EW a drones, pero que, al parecer, y según las medidas que están tomando los diferentes ejércitos aliados, la EW pretende avanzar en este sentido por las ventajas que ofrece.



La miniaturización de los dispositivos electrónicos y la suplantación de componentes físicos dedicados por líneas de código es algo que está sucediendo ahora mismo. Es muy difícil adelantarse a los acontecimientos, pero según todos los desarrollos que se están llevando a cabo en materia de SDR, junto con la incorporación de cargas de pago de EW sobre drones, me hace pensar que dentro de poco contaremos con una amplia gama de cargas de pago de EW basadas en SDR con diferentes posibilidades, dada la facilidad de modularidad en este tipo de sistemas.

Anteriormente, los mayores avances tecnológicos tenían objetivos militares principalmente, y se lograban durante los periodos de guerra, como por ejemplo el radar. Sin embargo, ahora son las empresas civiles las que lideran estos avances. Muchas veces, las unidades integran dentro de sus equipos material civil, en un intento desesperado de disponer de material acorde a las necesidades operativas del momento. A pesar de ello, el material civil no está preparado para soportar las demandas físicas del empleo militar, como pueden ser las inclemencias del tiempo o los golpes. Es por esto por lo que los ejércitos tienen que tener una relación más estrecha con las empresas para que ambos salgan beneficiados. Por un lado, los ejércitos consiguen tecnología de última generación dedicada para sus unidades, y por el otro lado las empresas obtienen beneficios y un cliente seguro. Además de estos beneficios que son obvios, también se generan sinergias y *feedback* que puede ser de utilizada para ambas partes.

Otro aspecto a mejorar serían los tiempos de cambio de material. Contamos con unidades que tienen en dotación equipos desde hace más de 20 años con problemas aún sin solucionar. Esto se debe a que los procedimientos seguidos son muy lentos y rígidos, dificultando el avance tecnológico del ejército. El desarrollo tecnológico que vivimos actualmente crece a un ritmo exponencial. Esto hace imperativo la reducción de los tiempos de adquisición, al mismo tiempo que los procedimientos seguidos se hacen más flexibles, todo ello con la finalidad de dotar a nuestras unidades del material que necesitan para cumplir su misión.

España se encuentra encuadrada dentro de la OTAN, y por tanto debe estar a la altura de pertenecer a esta organización. Hay que ser consciente que no tenemos la misma fuerza que puede tener EEUU, pero debemos demostrar el gran potencial que tiene nuestro país, ya que contamos con la infraestructura para poder seguir el cambio, además de contar con el mejor recurso humano. En poco tiempo mostraremos al mundo como somos uno de los países que deben liderar el desarrollo tecnológico.



6.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amazon (2021a) *Baofeng UV-5R*, Amazon. Available at: <https://www.amazon.com/-/es/Baofeng-UV-5R-144-148-420-450Mhz-1800mAh/dp/B074XPB313> (Accessed: 8 December 2021).
- Amazon (2021b) *Buy Multipurpose Dipole Antenna Kit*, Amazon. Available at: https://www.amazon.com/dp/B075445JDF/ref=as_li_ss_tl?ie=UTF8&linkCode=sl1&tag=rsv0f-20&linkId=c5befe9ec40bfb429944bbedba8dd37e (Accessed: 23 October 2021).
- Amazon (2021c) *Buy RTL-SDR V3*, Amazon. Available at: https://www.amazon.es/RTL-SDR-Blog-RTL2832U-definida-Software/dp/B0129EBDS2/ref=sr_1_2?dchild=1&keywords=RTL-SDR+Blog&qid=1635003176&sr=8-2 (Accessed: 23 October 2021).
- AMD (2005) 'AMD64 Technology Programmer ' s Manual Volume 3 : General-Purpose and System', 3(24594).
- AQPROX communications (2021a) 'APPUSB26AC', AQPROX communications.
- AQPROX communications (2021b) *Dual Band High Power Wireless USB External Adapter*, AQPROX communications. Available at: <http://approx.es/APPUSB26AC?search=APPUSB26AC> (Accessed: 20 October 2021).
- Arcos, G. and Ferreri, R. (2016) 'Aceleración de Radios Definidas por Software', *Instituto de computación de la universidad de la república de Uruguay*, pp. 43–47.
- Astroradio (2021a) *Buy Airspy HF+ Discovery – 209.33 €*, Astroradio. Available at: https://www.astroradio.com/p/airspy_hf_discovery/ (Accessed: 21 October 2021).
- Astroradio (2021b) 'Receptor RTL-SDR', Astroradio.
- Asymmetric Warfare Group Personnel (2020) 'Radio Silence : Preparing for Future Electronic Warfare', *NCO Journal*.
- Bachiller, C. (2020) 'Los mapas interactivos de la Universidad de Alcalá para conocer la evolución del coronavirus', *El diario*, 23 April. Available at: https://www.eldiario.es/castilla-la-mancha/de-ciencia/interactivos-universidad-alcala-evolucion-coronavirus_132_5896372.html (Accessed: 27 October 2021).
- Baofeng (2021) *Walkie Talkie Baofeng UV-5R*, Baofeng. Available at: <https://baofeng.es/walkie-talkies/baofeng-uv-5r.html> (Accessed: 8 December 2021).
- Benítez, J. and Hueso, J. (2016) 'MATLAB introducción', *Universidad Politécnica de Valencia*. Available at: <http://personales.upv.es/jbenitez/data/matlab.pdf>.
- Bonet Esteban, E. (2013) 'Servicios de acceso remoto II: SSH', *Departamento de Informática de la universidad de Valencia*.
- Borak, M. (2018) 'World's top drone seller DJI made \$2.7 billion in 2017', *Technode*, 3 January. Available at: <https://technode.com/2018/01/03/worlds-top-drone-seller-dji-made-2-7-billion-2017/> (Accessed: 26 October 2021).
- Butcher, G. et al. (2016) 'Tour of the electromagnetic spectrum', NASA.
- Cabello Rodríguez, J. L. (2018) 'Vehículos aéreos sin piloto. Una aproximación táctica', *Instituto Español de Estudios Estratégicos*, pp. 1–26.
- Casado Fernández, M. C. (2021) 'Manual Básico De Matlab'. Madrid: Servicios informáticos de la Universidad Complutense de Madrid.
- Castillo Castillo, J. M. (2018) 'Telecomunicaciones principios básicos', *Slideshare*.
- Castillo Prieto, E. (2016) *Análisis del comportamiento de personas mediante mapas de calor*.
- Cole, B. (2014) *What is maker movement?*, SearchERP. Available at:



<https://searcherp.techtarget.com/definition/maker-movement> (Accessed: 2 October 2021).

- Collins, T. F. *et al.* (2018) *Software-defined radio for engineers*, Artech House mobile communications series. doi: 10.1201/9780429353109-2.
- Contreras Howard, L. (2019) *Guía completa: el filamento PLA en la impresión 3D*, 3Dnatives. Available at: <https://www.3dnatives.com/es/guia-filamento-pla-en-la-impresion-3d-190820192/> (Accessed: 7 October 2021).
- Cook, P. G. and Bonser, W. (1999) 'Architectural overview of the SPEAKeasy system', *IEE Journal on selected areas in communications*, 17(4). doi: 10.1109/9780470546444.ch3.
- Defensa (2021) 'Los primeros RPAS Seeker en unidades de élite en las Fuerzas Armadas españolas', 14 May. Available at: <https://www.defensa.com/espana/primeros-rpas-seeker-unidades-elite-fuerzas-armadas-espanolas> (Accessed: 29 November 2021).
- Dirección General de Armamento y Material. Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica (2016) 'Proyecto Rapaz y tecnologías anti-RPAS'.
- Dirección General de Armamento y Material (2015) 'Plan Director de RPAS', p. 64.
- DJI (2021a) *Comprar Matrice 600 Pro - DJI Store*. Available at: https://store.dji.com/es/product/matrice-600-pro?site=brandsite&from=buy_now_bar (Accessed: 26 October 2021).
- DJI (2021b) *DJI - Página oficial*. Available at: <https://www.dji.com/es> (Accessed: 26 October 2021).
- DJI (2021c) *DJI Matrice 600 Pro - DJI*. Available at: <https://www.dji.com/es/matrice600-pro> (Accessed: 26 October 2021).
- DMR (2021) *Digital Mobile Radio Association*, DMR Association. Available at: <https://www.dmrassociation.org/index.html> (Accessed: 25 October 2021).
- Duggan, B. (2020) *Simulation example: Single Sideband transceiver*, Wiki GNU Radio Org. Available at: https://wiki.gnuradio.org/index.php/Simulation_example:_Single_Sideband_transceiver#SSB_transmitter (Accessed: 23 October 2021).
- EarToEarOak (2015a) *GitHub, EarToEarOak/RTLSDR-Scanner: A cross platform Python frequency scanning GUI for the OsmoSDR rtl-sdr library.*, GitHub Inc. Available at: <https://github.com/EarToEarOak/RTLSDR-Scanner> (Accessed: 19 October 2021).
- EarToEarOak (2015b) 'RTLSDR-Scanner', GitHub Inc.
- Electropeak (2021) *VK-162 GMOUSE USB GPS Navigation Module*, Electropeak. Available at: <https://electropeak.com/satellite-positioning-module-vk-162-gmouse-usb-gps> (Accessed: 20 October 2021).
- ESSOR industries (2019) 'ESSOR Architecture Description Documents Set ESSOR'. Available at: [http://www.occar.int/sites/default/files/downloads/ESSOR Architecture Introductory Document.pdf](http://www.occar.int/sites/default/files/downloads/ESSOR%20Architecture%20Introductory%20Document.pdf).
- Free Software Foundation (2021) *El sistema operativo GNU y el movimiento del software libre*, GNU Org. Available at: <https://www.gnu.org/> (Accessed: 20 October 2021).
- G. Pledger, T. (2021) *The Role of Drones in Future Terrorist Attacks*, Association of the United States army. Available at: <https://www.ausa.org/publications/role-drones-future-terrorist-attacks> (Accessed: 30 November 2021).
- Gavalda, J. (2019) *Marconi y la primera transmisión por radio de la historia*, National Geographic. Available at: https://historia.nationalgeographic.com.es/a/marconi-y-primer-transmission-por-radio-historia_14204 (Accessed: 21 October 2021).
- GNU Org. (2007) *The GNU General Public License v3.0*, GNU Org. Available at:



<http://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.html> (Accessed: 19 October 2021).

- GNU Radio project (2021) *GNU Radio: The Free & Open Source Radio Ecosystem*, GNU Radio project. Available at: <https://www.gnuradio.org/> (Accessed: 23 October 2021).
- Grupo de Usuarios de Software Libre de Córdoba (2021) *¿Qué es GNU/Linux?*, Grupo de Usuarios de Software Libre de Córdoba. Available at: <https://www.grulic.org.ar/node/10> (Accessed: 11 October 2021).
- GuilleVen (2021) *¿Qué es el Chipset? | Tecnología + Informática*, Tecnología+Informática. Available at: <https://www.tecnologia-informatica.com/que-es-chipset/> (Accessed: 2 October 2021).
- Halfacree, G. (2020) *The official Raspberry Pi Beginner's guide*.
- Hernández Chacón, C. (2010) 'Critpoanálisis práctico de WEP y WPA sobre WLAN 802.11', *Universidad politécnica de Cataluña*, p. 61. Available at: <http://www.recercat.net/handle/2072/42361>.
- Herter, C. A. (1985) 'The electromagnetic spectrum: a critical natural resource.', *Natural Resources Journal*, 25(3), pp. 651–663.
- *Información de Radio Mobile Online* (2021). Available at: <https://www.ve2dbe.com/rmonlineinfospa.html> (Accessed: 25 October 2021).
- INTA Copernicus Relay (2019) *¿UAV, UAS, RPAS o drones?*, Blog del INTA. Available at: https://www.inta.es/INTA/es/blogs/copernicus/BlogEntry_1553849310660# (Accessed: 26 October 2021).
- Intel (2021) *Referencia de chipset y sistema en un chip (SoC) para kits de Laptop Intel® NUC*, Intel. Available at: <https://www.intel.es/content/www/es/es/support/articles/000056878/intel-nuc/intel-nuc-laptop-kits.html> (Accessed: 1 October 2021).
- Izquiedo Nuñez, D. (2020) 'Teoría de la Comunicación, Tema 4: Transmisión Digital', *Centro Universitario de la Defensa*.
- JOY-IT (2021) *Armor Case "BLOCK ACTIVE"* - Joy-IT, JOY-IT. Available at: <https://joy-it.net/en/products/RB-ALUcase+07FAN> (Accessed: 19 October 2021).
- Keim, R. (2017) *Introduction to Software-Defined Radio - Technical Articles*, All about circuits. Available at: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-software-defined-radio/> (Accessed: 17 September 2021).
- Knerl, L. (2021) *What Is a Chipset | HP® Tech Takes*, HP. Available at: <https://www.hp.com/us-en/shop/tech-takes/what-is-a-chipset> (Accessed: 2 October 2021).
- Laufer, C. (2018) *The hobbyist's guide to the RTL-SDR*. Séptima ed. Kindle.
- Lipson, H. and Kurman, M. (2014) *La revolución de la impresión 3D*.
- Lloret, A. (2018) *¿Por qué esta batería es siempre la más vendida en Amazon?*, Computer Hoy. Available at: <https://computerhoy.com/noticias/tecnologia/que-esta-bateria-es-siempre-mas-vendida-amazon-309817> (Accessed: 21 October 2021).
- Mako Hill, B. et al. (2010) *The Official Ubuntu Book*.
- Marchante, L. (2020) *Cura: el software de laminado más popular para impresión 3D*, 3Dnatives. Available at: <https://www.3dnatives.com/es/cura-laminador-para-impresion-3d-250320202/> (Accessed: 8 October 2021).
- Mascareñas y Pérez-Iñigo, C. et al. (2016) 'Utilización de los dispositivos de Radio Definidos por Software como elementos de enseñanza de las Radiocomunicaciones', *Universidad de Cádiz*. Available at: <http://hdl.handle.net/10498/18759>.
- Maturana, J. (2020) 'Así es el Snapdragon 888 5G, el corazón Qualcomm de la gama top de 2021', *Computer Hoy*, 2 December. Available at: [41](https://computerhoy.com/noticias/tecnologia/snapdragon-</div><div data-bbox=)



888-5g-corazon-qualcomm-gama-top-2021-765907 (Accessed: 19 October 2021).

- Mchale, J. (2016) *Radar, electronic warfare, UAS payloads are steadiest part of military market, Military Embedded Systems*. Available at: <https://militaryembedded.com/comms/communications/radar-payloads-steadiest-part-military-market> (Accessed: 13 October 2021).
- Medina Hidalgo, S. R. (2021) 'La arquitectura del futuro', *Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid Universidad Politécnica de Madrid*.
- Méndez, J. B. (2009) 'Fundamentos físicos de la ingeniería Ingeniería Industrial, Tema 2 : Ondas.', *Dpt. Física aplicada de la universidad de Sevilla*.
- De Miguel, H. (2021) 'El espectacular vuelo de un dron de la UME sobre las bocas del volcán de La Palma', *La razón*, 4 October. Available at: <https://www.larazon.es/sociedad/20211004/cdeezulvezbu3efppyzakpqzde.html> (Accessed: 29 November 2021).
- Ministerio de Defensa (2021) *España, Francia y Alemania anuncian el inicio de la siguiente fase del programa NGWS/FCAS, un demostrador de avión de combate - Ministerio de Defensa de España, Notas de prensa*. Available at: <https://www.defensa.gob.es/gabinete/notasPrensa/2021/05/DGC-20210517-acuerdo-programa-fcas.html> (Accessed: 17 September 2021).
- Ministerio de Fomento (2018) 'Plan Estratégico drones en España 2018-2021', *Gobierno de España*, 1, pp. 27–31. Available at: https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/paginabasica/recursos/plan_estrategico_drones_2018-2021_0.pdf.
- MOTOROLA (2021) 'Product Spec Sheet MOTORBO DP4000 Series Portable Radios'. MOTOROLA.
- National Instruments (2019) 'Radio Definido por Software USRP', pp. 24–29. Available at: <https://www.ni.com/es-cr/shop/select/usrp-software-defined-radio-device>.
- National Marine Electronics Association (2021) *Standard NMEA 0183, National Marine Electronics Association*. Available at: https://www.nmea.org/content/STANDARDS/NMEA_0183_Standard (Accessed: 20 October 2021).
- NKE (2021) *Autodesk Inventor: qué es y sus ventajas, Blog NKE*. Available at: <https://www.nke360.es/autodesk-inventor-que-es-y-ventajas/> (Accessed: 20 October 2021).
- Núñez, D. I. (2020) 'Teoría de la Comunicación, Tema 5: Modulaciones Digitales', *Centro Universitario de la Defensa*.
- O'Connor, M. J. (2019) *Electronic Warfare for the Fourth Generation Practitioner, Small Wars Journal*. Available at: <https://smallwarsjournal.com/jrnl/art/electronic-warfare-fourth-generation-practitioner> (Accessed: 13 October 2021).
- Organización de aviación civil internacional (OACI) (2021) *Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana*. Available at: <https://www.mitma.gob.es/areas-de-actividad/aviacion-civil/organismos-internacionales/oaci> (Accessed: 26 October 2021).
- Ortin Gracia, J. (2021a) 'Tema 5: Nivel de red, Redes y Servicios de Comunicación II', *Centro Universitario de la Defensa*.
- Ortin Gracia, J. (2021b) 'Tema 6: Nivel de transporte, Redes y Servicios de Comunicación', *Centro Universitario de la Defensa*.
- Ortiz gil, A. (2019) 'LAS IMPRESORAS 3D COMO HERRAMIENTAS CIENTÍFICAS', *Observatori Astronomic de la Universitat de Valencia*. Available at: http://www.encuentros-multidisciplinares.org/revista-61/amelia_ortiz_gil.pdf.
- OTAN (2021) *¿Qué es la OTAN?, OTAN*. Available at: <https://www.nato.int/nato->



welcome/index_es.html (Accessed: 19 October 2021).

- PA3FWM (2008) *WebSDR*. Available at: <http://www.websdr.org/>.
- PcComponentes (2021) *Approx APPUSB26AC Antena WiFi 26 dBi 5GHz + Adaptador USB Inalámbrico 600Mbps*, PcComponentes. Available at: <https://www.pccomponentes.com/approx-appusb26ac-antena-wifi-26-dbi-5ghz-adaptador-usb-inalambrico-600mbps> (Accessed: 20 October 2021).
- Peralta, Á. (2014) 'Principios físicos del láser para todos los públicos | Desayuno con fotones', *Desayuno con fotones*, October. Available at: <https://desayunoconfotones.org/2014/10/16/principios-fisicos-del-laser-para-todos-los-publicos/> (Accessed: 19 October 2021).
- Pérez, E. (2020) 'Estados Unidos bloquea a DJI: añaden al fabricante de drones a la "Entity List" por su relación con el gobierno chino', *Xataka*, 18 December. Available at: <https://www.xataka.com/legislacion-y-derechos/estados-unidos-bloquea-a-dji-anaden-al-fabricante-drones-a-entity-list-su-relacion-gobierno-chino> (Accessed: 26 October 2021).
- POWERADD (2020) 'Portable Charger Power Bank Pilot X7 20000mAh', *POWERADD*.
- Raspberry Pi (2016) 'Mechanical drawing Raspberry Pi 3B Plus'. Raspberry Pi Foundation. Available at: https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/mechanical/rpi_MECH_3bplus.pdf.
- Raspberry Pi Foundation (2016) 'Raspberry Pi 3 Model B - Raspberry Pi', *Raspberry Pi 3 Model B*. Available at: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>.
- Raspberry Pi Foundation (2021a) *About Raspberry Pi Foundation*, *Raspberry Pi Foundation*. Available at: <https://www.raspberrypi.org/about/> (Accessed: 1 October 2021).
- Raspberry Pi Foundation (2021b) *Buy a Raspberry Pi 3 Model B+ – Raspberry Pi*, *Raspberry Pi Foundation*. Available at: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/> (Accessed: 19 October 2021).
- Red Hat (2021) *Understanding Linux*, *Red Hat*. Available at: <https://www.redhat.com/es/topics/linux> (Accessed: 20 October 2021).
- Regimiento de Guerra Electrónica Nº31 (2021) 'Revista Ejército REW31', *Revista Ejército*.
- Reyes, H. (2021) *Russia's 'Orion' Drone to Get Electronic Warfare System*, *The Defense Post*. Available at: <https://www.thedefensepost.com/2021/08/23/russia-orion-drone-electronic-warfare-system/> (Accessed: 13 October 2021).
- Richardson, T. (2010) 'Protocolo RFB'. RealVNC Ltd.
- Rico Secades, M. (2010) 'Comunicaciones, Antenas', *Universidad de Oviedo*.
- Rios, D. A. (2011) 'Seguridad En Redes Wi-Fi: una guía de aproximación para el empresario', *Instituto nacional de ciberseguridad*.
- Roberson, D. (2021) *What is 3D printing?*, *Ultimaker*. Available at: <https://ultimaker.com/es/learn/what-is-3d-printing> (Accessed: 8 October 2021).
- Robert, M. and Fette, B. A. (2009) *The Software-Defined Radio as a Platform for Cognitive Radio*. First Edit, *Cognitive Radio Technology*. First Edit. Elsevier Inc. doi: 10.1016/B978-0-12-374535-4.00003-5.
- Romero Ternero, M. del C. (2005) 'Tema 3 :Transmisión de datos', *Dpto. de Tecnología Electrónica de la universidad de Sevilla*.
- RTL-SDR (2021) *Buy RTL-SDR Dongles (RTL2832U)*, *RTL-SDR*. Available at: <https://www.rtl-sdr.com/buy-rtl-sdr-dvb-t-dongles/> (Accessed: 23 October 2021).
- Sánchez Tapia, C. (2020a) 'Sistemas lineales, análisis espectral I', *Centro Universitario de la*



Defensa, pp. 127–172. doi: 10.1007/978-88-470-0504-4_5.

- Sánchez Tapia, C. (2020b) 'Sistemas lineales, Tema 1: Introducción', *Centro Universitario de la Defensa*. doi: 10.1007/978-88-470-0504-4_5.
- Sánchez Tapia, C. (2020c) 'Sistemas lineales, Tema 4: Modulaciones en Amplitud', *Centro Universitario de la Defensa*. doi: 10.1007/978-88-470-0504-4_5.
- Sánchez Tapia, C. (2020d) 'Sistemas lineales, Tema 5: Modulaciones Angulares', *Centro Universitario de la Defensa*. doi: 10.1007/978-88-470-0504-4_5.
- Serna C., L., Rodríguez de S., A. and Albán A., F. (2003) 'Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones', *Ingeniería y Competitividad*, 5(1). doi: 10.25100/iyc.v5i1.2301.
- Serres, C. (2012) 'Manual general de antenas dipolo', *Telecoms*.
- Shaik, A. (2021a) 'Amplitude Modulation – Physics and Radio-Electronics', *Physics and Radio-Electronics*. Available at: <https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/amplitude-modulation/> (Accessed: 19 October 2021).
- Shaik, A. (2021b) *Frequency Modulation – Physics and Radio-Electronics*, *Physics and Radio-Electronics*. Available at: <https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/frequency-modulation/> (Accessed: 19 October 2021).
- Shaik, A. (2021c) *Phase Modulation*, *Physics and Radio-Electronics*. Available at: <https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/phase-modulation/> (Accessed: 20 October 2021).
- Sistema de observación y prospectiva tecnológica (2009) 'Monografías del SOPT: La guerra electrónica en España', *Publicaciones del Ministerio de Defensa*, pp. 16–25, 66–73.
- Sol Llaven, D. (2015) 'Sistemas operativos.', *Universidad de Alicante*, p. 341.
- Soto, J. A. (2021) *¿Qué es VNC y para qué sirve?*, *GEEKNETIC*. Available at: <https://www.geeknetic.es/VNC/que-es-y-para-que-sirve> (Accessed: 20 October 2021).
- Spezio, A. E. (2002) 'Electronic warfare systems', *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3), pp. 633–644. doi: 10.1109/22.989948.
- Stallman, R. (2020) *Linux y GNU. Proyecto GNU: Free Software Foundation, GNU Org*. Available at: <https://www.gnu.org/gnu/linux-and-gnu.es.html> (Accessed: 11 October 2021).
- Stewart, B. et al. (2017) *Software Defined Radio using MATLAB and Simulink and the RTL-SDR*. Glasgow, Scotland, UK: University of Strathclyde. Available at: www.desktopSDR.com.
- Tato, A. (2018) 'Software Defined Radio: A Brief Introduction', *Proceedings*. doi: 10.3390/proceedings2181196.
- Tecnitrán Telecomunicaciones (2021) *Motorola DP4400*, *Tecnitrán Telecomunicaciones*. Available at: <https://www.tecnitran.es/walkie-talkie/motorola-dp4400e/> (Accessed: 8 December 2021).
- Thales Group (2020) *Las radios tácticas: a la vanguardia de la transformación digital de las Fuerzas Armadas*, *Revista de Thales Group*. Available at: <https://www.thalesgroup.com/es/espana/magazine/las-radios-tacticas-vanguardia-transformacion-digital-las-fuerzas-armadas> (Accessed: 17 September 2021).
- Thingiverse (2021) *Thingiverse - Digital Designs for Physical Objects*, *Thingiverse*. Available at: <https://www.thingiverse.com/> (Accessed: 19 October 2021).
- Tienda oficial Artillery3D (2021) *Artillery Sidewinder X1 2021*, *Tienda oficial Artillery3D*. Available at: <https://artillery3d.es/artillery-sidewinder-x1/> (Accessed: 19 October 2021).
- UIT (1999) 'Recomendación UIT-R P.341-5 sobre noción de pérdidas de transmisión en los enlaces radioeléctricos'. UIT.



- Ultimaker (2021) *Ultimaker Cura: software de impresión 3D potente y fácil de usar*, Ultimaker. Available at: <https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura> (Accessed: 8 October 2021).
- Unión internacional de telecomunicaciones (2021) *A qué se dedica la UIT*. Available at: <https://www.itu.int/es/about/Pages/whatwedo.aspx> (Accessed: 26 October 2021).
- Uptowndisco (2016) *Yuneec Typhoon H - Gimbal Camera top plate mount*, Thingiverse. Available at: <https://www.thingiverse.com/thing:1683583> (Accessed: 28 September 2021).
- US, P. (2021) *Buy Great Scott Gadgets HackRF One*, PiShop US. Available at: <https://www.pishop.us/product/great-scott-gadgets-hackrf-one-software-defined-radio/> (Accessed: 21 October 2021).
- Valles Castro, A. (2014) 'La amenaza "TEMPEST". Esa gran desconocida.', *Temas profesionales. Armada española*, pp. 883–892.
- Waghay, N. (2012) 'Electronic Warfare : The Next Step in National Security', *Military College of Electronics & Mechanical Engineering*, p. 5.
- YUNEEC International (2021a) *Store YUNEEC*. Available at: <https://store.yuneeec.com/> (Accessed: 28 September 2021).
- YUNEEC International (2021b) *Typhoon H Plus*, YUNEEC Interantional. Available at: <https://store.yuneeec.com/typhoon-h-plus.html> (Accessed: 19 October 2021).
- YUNEEC International (2021c) 'YUNEEC Typhoon H plus User manual', 148.
- YUNEEC US (2021) *US. YUNEEC*. Available at: <https://us.yuneeec.com/> (Accessed: 28 September 2021).



ANEXOS



Anexo I: The radio spectrum.

En este anexo, se muestra en la Tabla I las principales frecuencias que se utilizan en radiocomunicaciones, así como su designación, longitud de onda, subdivisión métrica y usos típicos.

Wavelength	Frequency	Band designation	Metric subdivision	Typical uses
100 Km-10Km	3KH-30KHz	VLF	Myriametric waves	Very long-range point-point communications (over 1000 nautical miles)
10Km-1Km	30KHz-300KHz	LF	Kilometric waves	Long and medium range point-point communications, radionavigation aids, aeronautical mobile
1Km-100m	300KHz-3MHz	MF	Hectometric waves	Medium and short-range communication. AM broadcasting, aeronautical mobile, radionavigation, marine radiophone, Loran, international distress, disaster amateur
100m-10m	3MHz-30MHz	HF	Decametric waves	Medium and long-range communication, international broadcasting, international point-point, air-ground, ship-shore, space research, amateur, radio astronomy
10m-1m	30MHz-300MHz	VHF	Metric waves	Short range line of sight communication, over horizon 'scatter' communication, HFH Television, FM broadcasting, space tracking and telemetry, satellites, aeronautical distress, worldwide radio navigation, land mobile, amateur, radio astronomy
1m-10cm	300MHz-3GHz	UHF	Decimetric waves	Short range communications, microwave relay, over horizon 'scatter' communications, UHF television, instructional TV, land mobile, weather satellites, meteorological aids, space tracking and telemetry, radar, worldwide aeronautical radionavigation, amateur, radio astronomy



10cm-1cm	3GHz-30GHz	SHF	Centimetric waves	Microwave relay, deep space, space research, telemetry, communications satellites, radar, aeronautical radio navigation, meteorological aids, amateur citizens, radio astronomy
1cm-1mm	30GHz-300GHz	EHF	Milimetric waves	Microwave relay, space research, radionavigation, amateur, radio astronomy, broadcast satellites

Tabla I: The radio spectrum. **Fuente:** (Herter, 1985).



Anexo II: GNU Radio y ejemplo de diagramas de bloques para un transmisor y receptor SSB.

En este anexo se muestra en la Figura 53 el logotipo de GNU Radio.



Figura 53: Logotipo de GNU Radio. **Fuente:** (GNU Radio project, 2021).

En la Figura 54, podemos ver la pantalla principal del entorno GNU Radio.

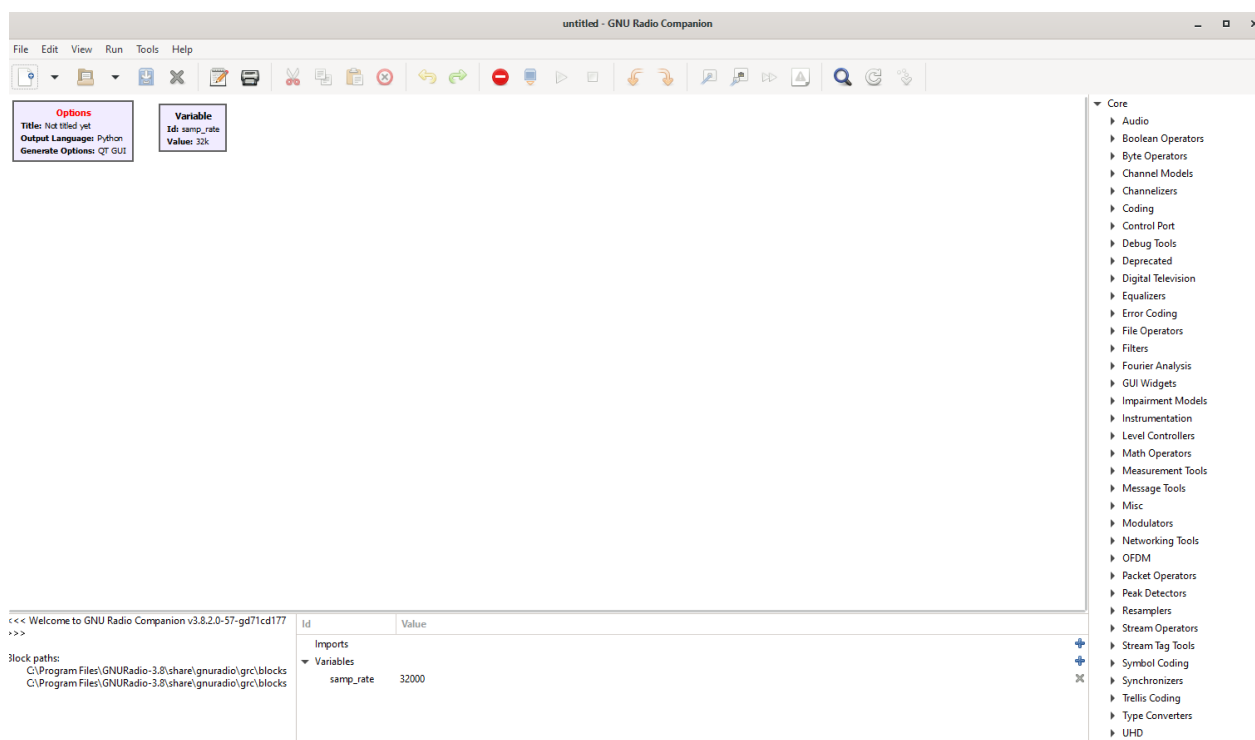


Figura 54: Pantalla principal del entorno GNU Radio. **Fuente:** Elaboración propia.

En las Figuras 55 y 56, se muestra un ejemplo de diagramas de bloques en GNU Radio para un transmisor y receptor SSB respectivamente.

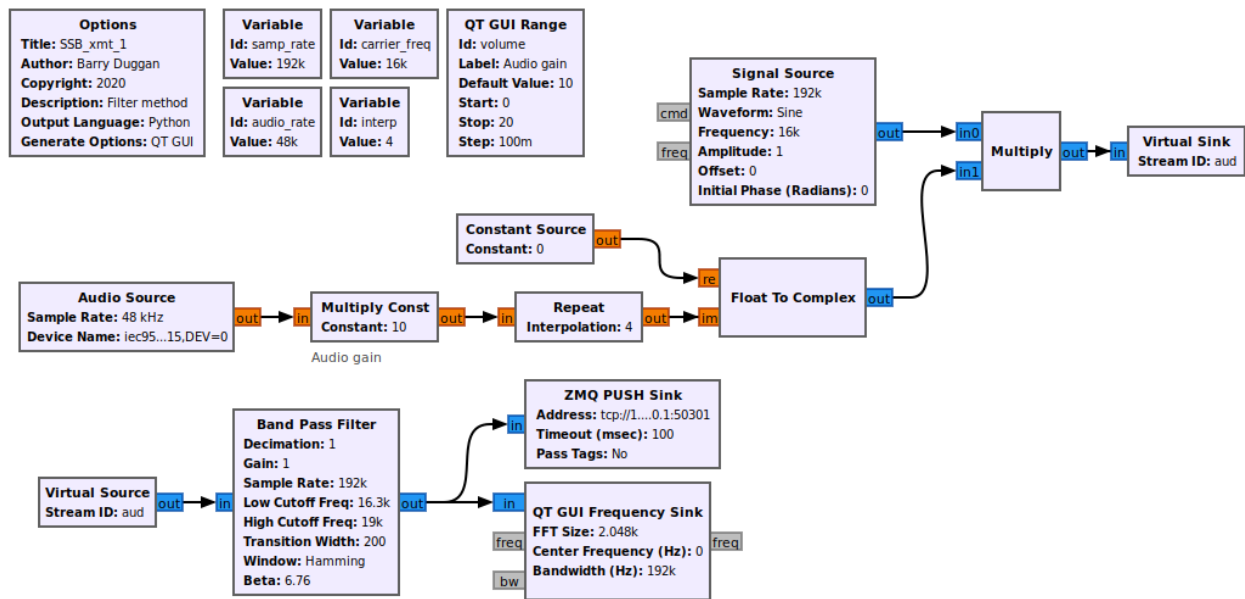


Figura 55: Diagrama de bloques en GNU Radio para un transmisor SSB. Fuente: (Duggan, 2020).

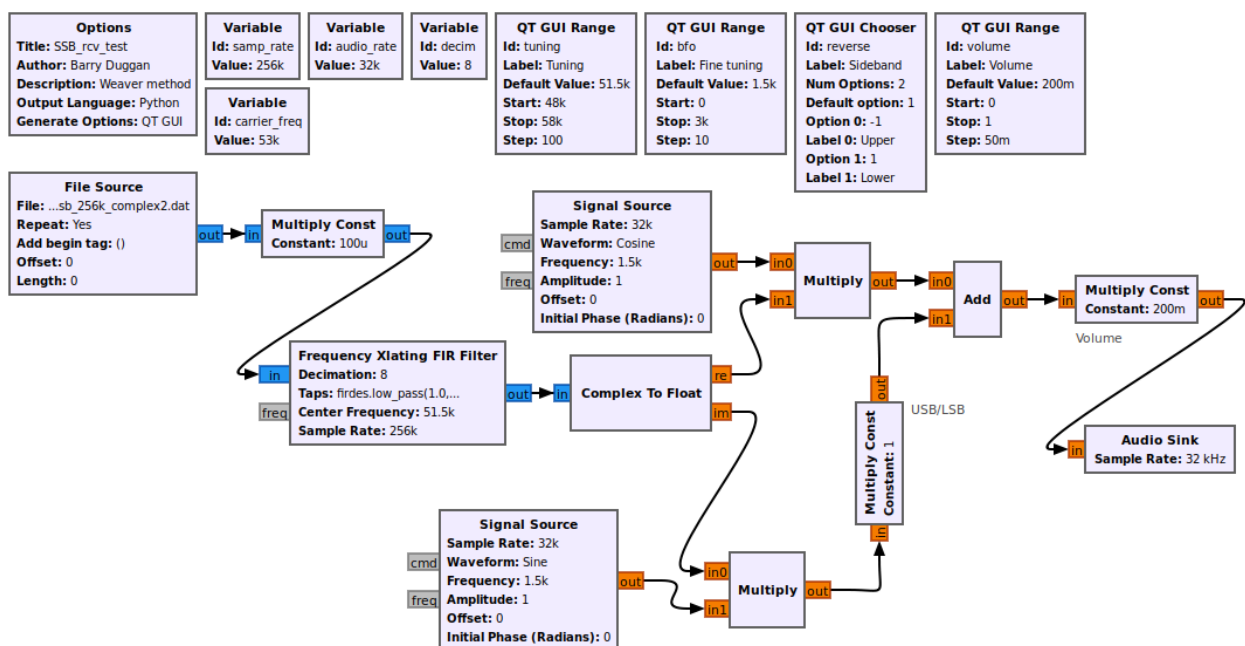


Figura 56: Diagrama de bloques en GNU Radio para un receptor SSB. Fuente: (Duggan, 2020).



Anexo III: Proyecto Tactica en atlantTTic.

En este anexo se muestra en la Figura 57, el diagrama de bloques del sistema de comunicaciones satélite desarrollado y empelado en el proyecto Tactica de atlantTTic (Universidad de Vigo, Galicia, España).

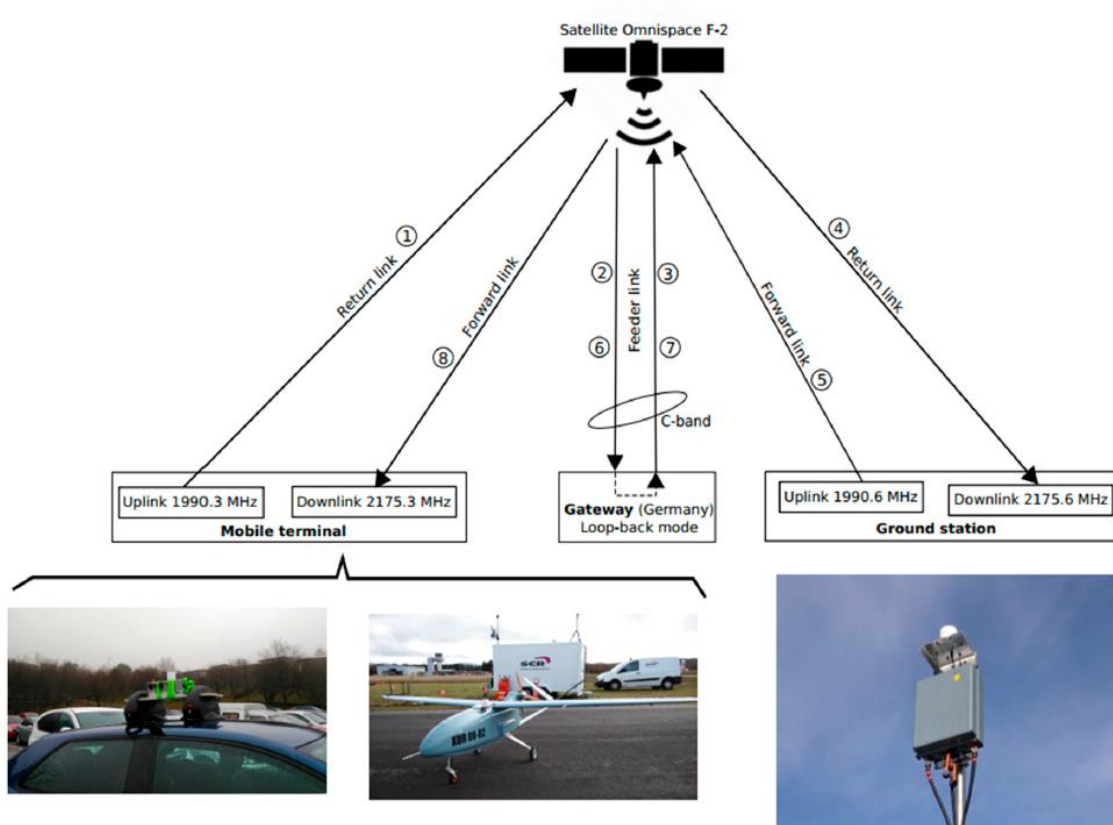


Figura 57: Diagrama de bloques del sistema de comunicaciones satélite creado en el proyecto Tactica.

Fuente: (Tato, 2018).



Anexo IV: webSDR.

En este anexo se muestran dos capturas de pantalla de la webSDR. En la Figura 58, se puede ver la página principal de la web, con un filtro aplicado para mostrar en pantalla las estaciones SDR de Europa.

A WebSDR is a Software-Defined Radio receiver connected to the internet, allowing many listeners to listen and tune it simultaneously. SDR technology makes it possible that all listeners tune independently, and thus listen to different signals; this is in contrast to the many classical receivers that are already available via the internet.

More background information is available [here](#). Questions and comments can be sent to [PA3FWM](#), the author of the WebSDR software and maintainer of this site, but please check the [frequently asked questions](#) first.

WebSDR servers can register themselves automatically on this site, leading to the below list of currently active WebSDR servers.

Since September 2018, the Chrome browser occasionally starts to play white noise on WebSDR sites. As a workaround, muting and unmuting usually restores normal audio. Chromium engineers are looking into the [problem](#). Alternatively, use a different browser, like [Firefox](#).

In December 2018, Chrome v71 seems to have fixed this issue!

Currently there are 180 servers active, with 1164 users and 835 MHz of radio spectrum.

Filter band: and region: and ☐ mobile support and covering MHz.

Location and URL	Frequency range	Antenna
WebSDR at the University of Twente, Enschede, NL http://webdr.ewi.utwente.nl:8901/ JO32KF; 310 users	0.000 - 29.160 MHz	Mini-Whip
BATC & AMSAT-UK QO-100 (Es'Hail-2) Geostationary Satellite WebSDR http://eshail.btc.org.uk:8901/ IO70JB; 54 users	10489.500 - 10490.000 MHz	1.3m Dish -> GPS-locked Octagon LNB -> Airspy Receiver
160m, 60m, 80m, 40m and 17m SDR's from Nantwich in Cheshire http://hackersdr.org:8901/ IO83RA; 58 users	1.804 - 1.996 MHz 3.600 - 3.792 MHz 5.237 - 5.428 MHz 7.008 - 7.200 MHz 14.130 - 14.322 MHz 18.019 - 18.211 MHz	204 foot long double size G5RV
WebSDR in C3 Ordino - ANDORRA PRINCIPALITY - ARDAM Ham Radio Association - RX 4 pcs FuncubeDongle Pro+ http://sdr.radioandorra.org/ JN02SN; 36 users	7.008 - 7.200 MHz 5.262 - 5.454 MHz 3.610 - 3.802 MHz 14.043 - 14.235 MHz	Half wave Dipole. Short dipole. Half wave Dipole.
WebSDR Wismar (Germany) by DO7AX http://d7ax-webdr.ham-radio-op.net:8901/ JO53RV; 65 users	3.188 - 4.212 MHz 6.578 - 7.602 MHz 9.603 - 10.627 MHz 13.688 - 14.712 MHz 144.788 - 145.812 MHz	84m Delta Loop 1.6-32MHz bandpass filter, RTL-SDR and a Ham It Up Plus HF Upconverter Diamond X-200, RTL-SDR
RW3PS webdr in Tula, Russia http://webdr.rw3ps.ru:8901/ RU3PS; 1 users	1.353 - 2.377 MHz 3.236 - 4.613 MHz	Inverted V and RTL-SDR V3

Figura 58: Página principal de la WebSDR con las estaciones receptoras de Europa. Fuente: (PA3FWM, 2008).

En la Figura 59 podemos ver un mapa de la península ibérica donde se muestran las localizaciones de las estaciones receptoras.

Turnstyle http://81.86.193.1/ IO93XM; 1 users	49.226 - 51.274 MHz 739.163 - 740.187 MHz 143.976 - 146.024 MHz	104
lindenblad http://143.976-146.024MHz.com/ 2M, 70cm 23cm WEBSDR in Cleethorpes, North East Lincolnshire. 4 x RTL Dongles, X300 dual band antenna and ant 23cm Alford Slot http://radiospeak.co.uk:81/ IO93XN; 0 users	143.976 - 146.024 MHz 431.976 - 434.024 MHz 433.976 - 436.024 MHz 1295.980 - 1298.020 MHz	105
hor pol slot antenna http://2319.990-2321.010MHz.com/ 2.3 GHz webdr @ 60m agl http://webdr.pf6hv.ampr.org:8901/ JO21RL; 0 users	2319.990 - 2321.010 MHz	106
X-5000, RTL-SDR + LNA, Rasp Pi4 http://1296.020-1298.060MHz.com/ 23cm WEB SDR by SVISSF.RTL-SDR Raspberry pi4 X5000 http://ath23cm.ham-radio-op.net:8901/ KM18ua; 0 users	1296.020 - 1298.060 MHz	107

Figura 59: Localización de las estaciones receptoras de la WebSDR en la península ibérica. Fuente: (PA3FWM, 2008)



Anexo V: Especificaciones técnicas Yuneec Typhoon H Plus.

En este anexo se muestran las especificaciones técnicas del dron Yuneec Typhoon H plus obtenidas directamente desde su manual de usuario en la Figura 60.

Specifications

Aircraft		Motor Type	Permanent Magnet Brushless DC motor
Product Name	APV System		
Model	TYPHOON H PLUS		
Max Takeoff Weight	72.31oz (2050g)	Flight Battery	
Dimensions	21.9x19.1x12.0in (556x485x305mm)	Type	LIPO 4S
Diagonal Size (Propellers Excluded)	20.4in (520mm) (Six Rotors)	Capacity	5250mAh
Propeller Size	9.8in (248mm)	Voltage	15.2V
Propeller Pitch	5.7in (145mm)	Energy	79.8Wh
Max Ascent Speed	8.9mph (4m/s)	Net Weight	20.5oz (580g)
Max Descent Speed	5.6mph (2.5m/s)	Charger	SC4000-4H
Max Speed	Sport: 44.7mph (72Km/h), Angle: 31.1mph (50Km/s)	Charging Time	Approx. 1.5h-2h
Max Tilt Angle	Sport mode: 35°, Angle: 35°	Max Charging Current	5A
Max Angular Speed	150°/s		
Max Service Ceiling Above Sea Level	16404ft (5000M) (Tested)	ST16S Ground Station	
Max Flight Time	Approx. 25min	Product Name	Personal Ground Station
Operating Temperature Range	32° to 104°F (0° to 40°C)	Model	ST16S
Satellite Positioning Systems	GPS/GLONASS	Operating System	Android™
Operating Environment	Regular Flight Condition, No Transparent Obstacles	Number of Channels	16
Obstacle Sensory Range	1.6ft-30ft (0.5m-10m) (RealSense)	Control Transmission Distance/Range	Up to 1 mile (1.6Km) (Optimum condition)
Front Obstacle Avoidance Sensor	Ultrasonic Sensor and RealSense	Video Link Frequency Band	5.8GHz WiFi
		Video Transmission Distance/Range(Optimum Conditions)	FCC Compliance: up to 1.2mile (2Km) CE Compliance: up to 1.2mile (2Km)
		LCD Screen Size	7in
		Built-in Battery Voltage/Capacity	3.6V 8700mAh 31.32Wh Li-ion
		Max Charge Current	1A
RealSense			H.264 4096×2160 (24/25/30/48/50/60fps) 3840×2160 (24/25/30/48/50/60fps) 2720×1530 (24/25/30/48/50/60fps) 1920×1080 (24/25/30/48/50/60/120fps) 1280×720 (24/25/30/48/50/60/120fps)
Weight	2.5oz (70g)		H.265 4096×2160 (24/25/30fps) 3840×2160 (24/25/30fps) 2720×1530 (24/25/30/48/50/60fps) 1920×1080 (24/25/30/48/50/60/120fps) 1280×720 (24/25/30/48/50/60/120fps)
Dimensions	6.0”4.2in (153*107mm)		
Maximum detecting distance from forward facing obstacle	23ft (7m)		
Distance front collision avoidance	0.8ft to 23ft (varying according to the environment)		
Ground to IPS distance	13.1ft (4m)		
Maximum speed under module collision avoidance	8.9mph (4m/s)		
Field of view(vertical)	40°		
Field of view(Horizontal)	60°		
C23 Gimbal Camera			
Product Name	3-Axis Gimbal Camera		
Model	C23		
General			
Dimensions	4.5x3.1x5.1in (115x80x130mm)	Photo Formats	JPEG, JPEG+DNG
Weight	12.3oz (275g)	Video Formats	MP4
Operating Temperature	32° to 104°F (0° to 40°C)	Photography Modes	Single, Burst (3/5/7), Interval (5s, 7s, 10s, 15s, 20s)
Storage Temperature	14° to 122°F (-10° to 50°C)	Exposure Mode	Auto Exposure, Manual Exposure
SD Card Max/Min Capacity	128GB	Exposure Compensation	±3.0
Gimbal		ISO Range	100 – 6400
Stabilization	3-axis (pitch, roll, yaw)	Electronic Shutter Speed	4 – 1/8000s
Angular Vibration Range	±0.02°		
Mount	Detachable	White Balance	Lock, Daylight, Cloudy, Automatic, Fluorescent, Incandescent, Sunrise
Max Angular Velocity	Pitch: 30°/s, Yaw: 120°/s		
Camera		Metering Mode	Spot Metering, Center Metering, Average
Controllable Range	Pitch: -90° to +15°		
Sensor	1 in CMOS, Effective Pixel: 20MP		
Lens	FOV 91° F/2.8, 23mm Format Equivalent		
Photo Resolutions	3:2, 5472x3648 4:3, 4864x3648 16:9, 5472x3080		

Figura 60: Especificaciones técnicas del dron Yuneec Typhoon H plus. **Fuente:** (YUNEEC International, 2021c).

Anexo VI: Clasificaciones de drones.

En la Figura 61 se muestra una clasificación de los drones atendiendo a su arquitectura física.

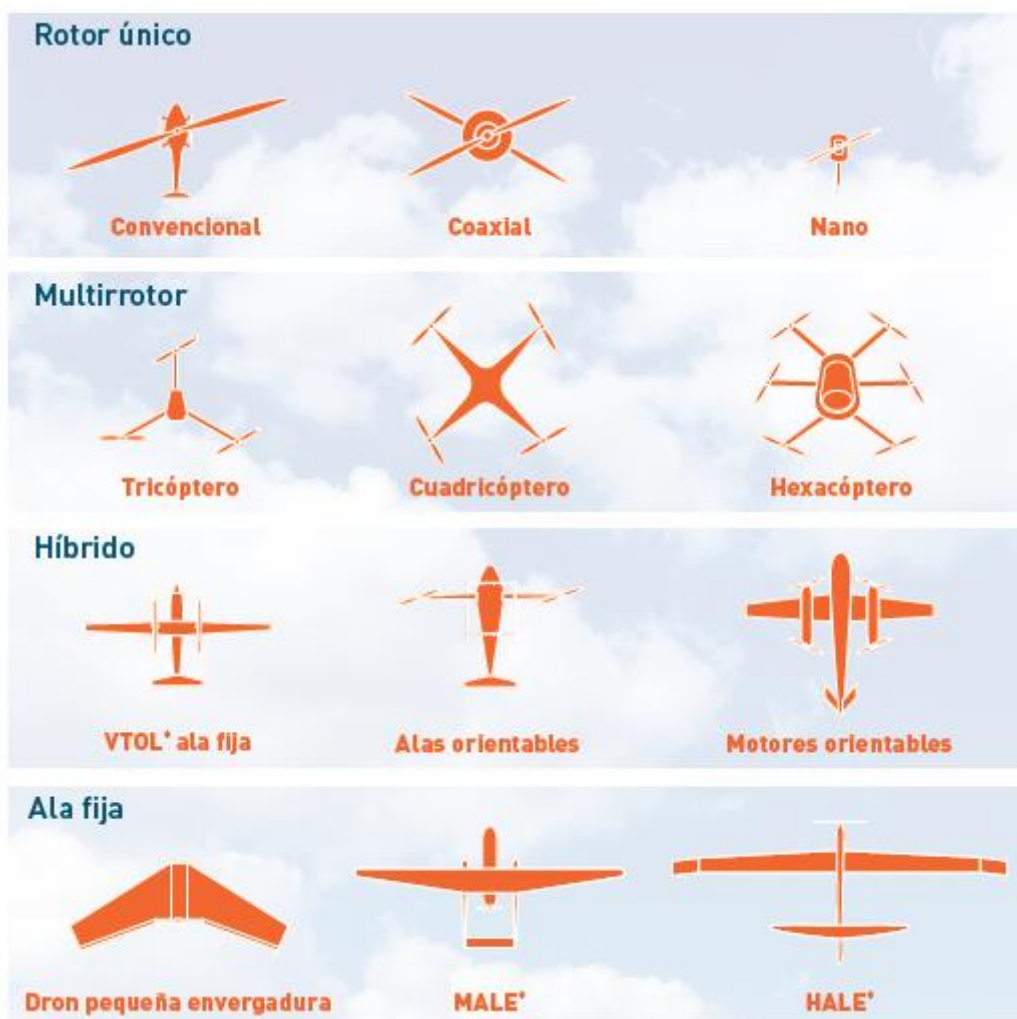


Figura 61: Tipología de drones atendiendo a su arquitectura. **Fuente:** (Ministerio de Fomento, 2018).

En la Figura 62 se muestra la clasificación de los LSS UAS (Clase I, < 150 Kg) según OTAN.

Categoría	Peso (Kg)	Carga útil (Kg)	Autonomía espacial (Km)	Autonomía temporal (h)	Velocidad (Km/h)	Altura de vuelo (m)
Nano	< 0,5	< 0,1	< 1,5	< 0,5	< 0,5	100
Micro	< 2	< 1	< 10	< 1,5	< 1,5	1500
Mini Ligero	< 10	< 5	< 25	< 3	< 3	3000
Mini Pesado	< 25	< 12	< 50	< 5	< 5	4000
Pequeños	< 150	< 50	< 150	< 12	< 12	6000

Figura 62: Clasificación de los RPAS de clase I según NATO. **Fuente:** (Cabello Rodríguez, 2018).



Anexo VII: Diseño mecánico de la Raspberry Pi 3 Model B+.

En la Figura 63 se muestra un dibujo con todas las medidas de la Raspberry Pi 3 Model B+.

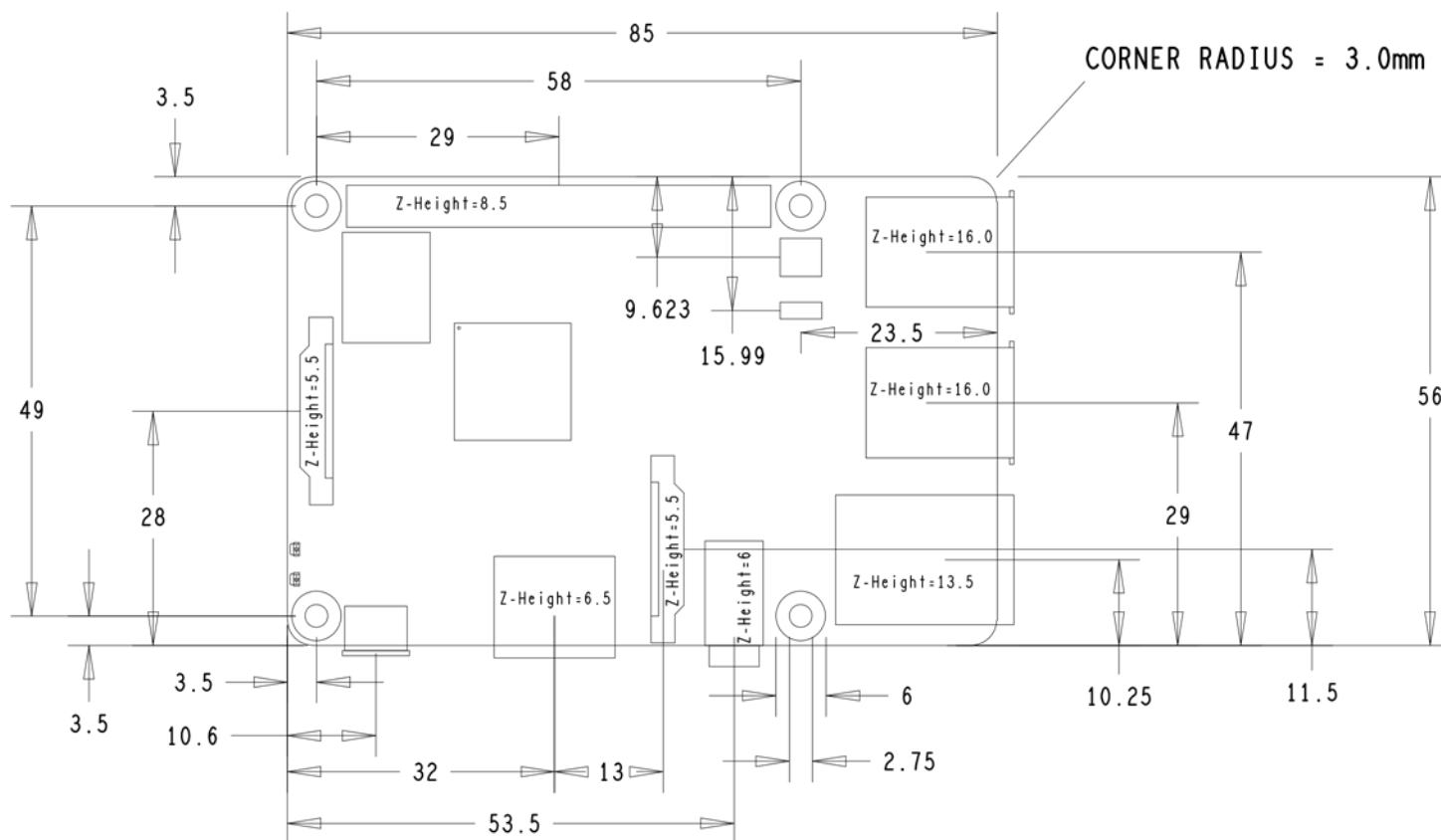


Figura 63: Diseño mecánico de la Raspberry Pi 3 Model B+. **Fuente:** (Raspberry Pi, 2016).



Anexo VIII: Especificaciones técnicas Raspberry Pi 3 Model B+.

En la Figura 64 se muestran las especificaciones técnicas de la Raspberry Pi 3 Model B+.

Specifications

Processor:	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 64-bit SoC @ 1.4GHz
Memory:	1GB LPDDR2 SDRAM
Connectivity:	<ul style="list-style-type: none">■ 2.4 GHz and 5 GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 4.2, BLE■ Gigabit Ethernet over USB 2.0 (maximum throughput 300Mbps)■ 4 × USB 2.0 ports
Access:	Extended 40-pin GPIO header
Video & sound:	<ul style="list-style-type: none">■ 1 × full size HDMI■ MIPI DSI display port■ MIPI CSI camera port■ 4 pole stereo output and composite video port
Multimedia:	H.264, MPEG-4 decode (1080p30); H.264 encode (1080p30); OpenGL ES 1.1, 2.0 graphics
SD card support:	Micro SD format for loading operating system and data storage
Input power:	<ul style="list-style-type: none">■ 5V/2.5A DC via micro USB connector■ 5V DC via GPIO header■ Power over Ethernet (PoE)–enabled (requires separate PoE HAT)
Environment:	Operating temperature, 0–50 °C
Compliance:	For a full list of local and regional product approvals, please visit www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b+
Production lifetime:	The Raspberry Pi 3 Model B+ will remain in production until at least January 2023.

Figura 64: Ficha técnica de la Raspberry Pi 3 Model B+. **Fuente:** (Raspberry Pi Foundation, 2016).



Anexo IX: Especificaciones técnicas RTL2832U V3.

En la Figura 65 se puede observar la disposición de los elementos físicos de la RTL SDR V3.

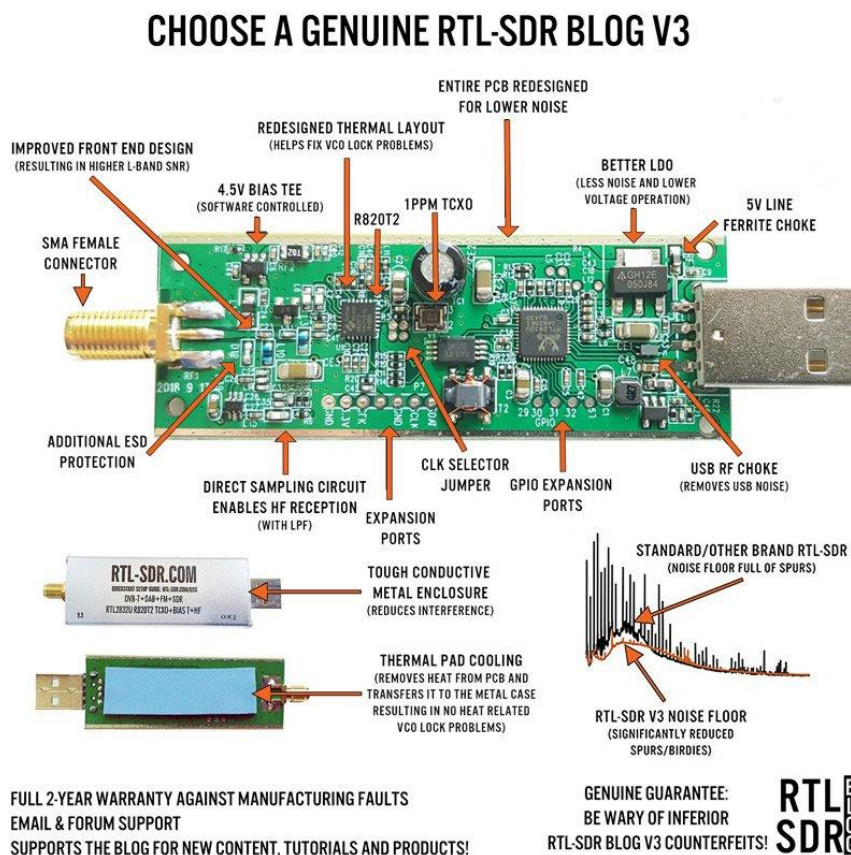


Figura 65: Cartel ilustrativo de los componentes de la RTL2832U V3. **Fuente:** (RTL-SDR, 2021).

Características (Astroradio, 2021b):

- Recepción SDR completa desde 500Khz a 1,766 GHz.
- ((*)500 kHz a 24 MHz con prestaciones reducidas).
- ADC 8 bit
- *Chip* RT820T2 más sensible que el antiguo R820T y 100% compatible con *software* del R820T
- Salida opcional de 4,5V, para la alimentación de preamplificadores a través del cable.
- Coaxial.
- Conexión USB al ordenador.
- Buen margen dinámico de recepción.
- Audio de gran limpieza y claridad.
- Conector de antena SMA dorado.
- Caja metálica que facilita la disipación de calor.
- Dimensiones muy reducidas.
- 45x55x15 mm.
- *Software* de recepción de uso libre.
- Hasta 3,2 MHz de frecuencia de muestreo (ancho de banda en pantalla).



Anexo X: Documentación del soporte de la carga de pago.

En este anexo se muestran los planos de todas las piezas de la carga de pago y el plano de explosionado.

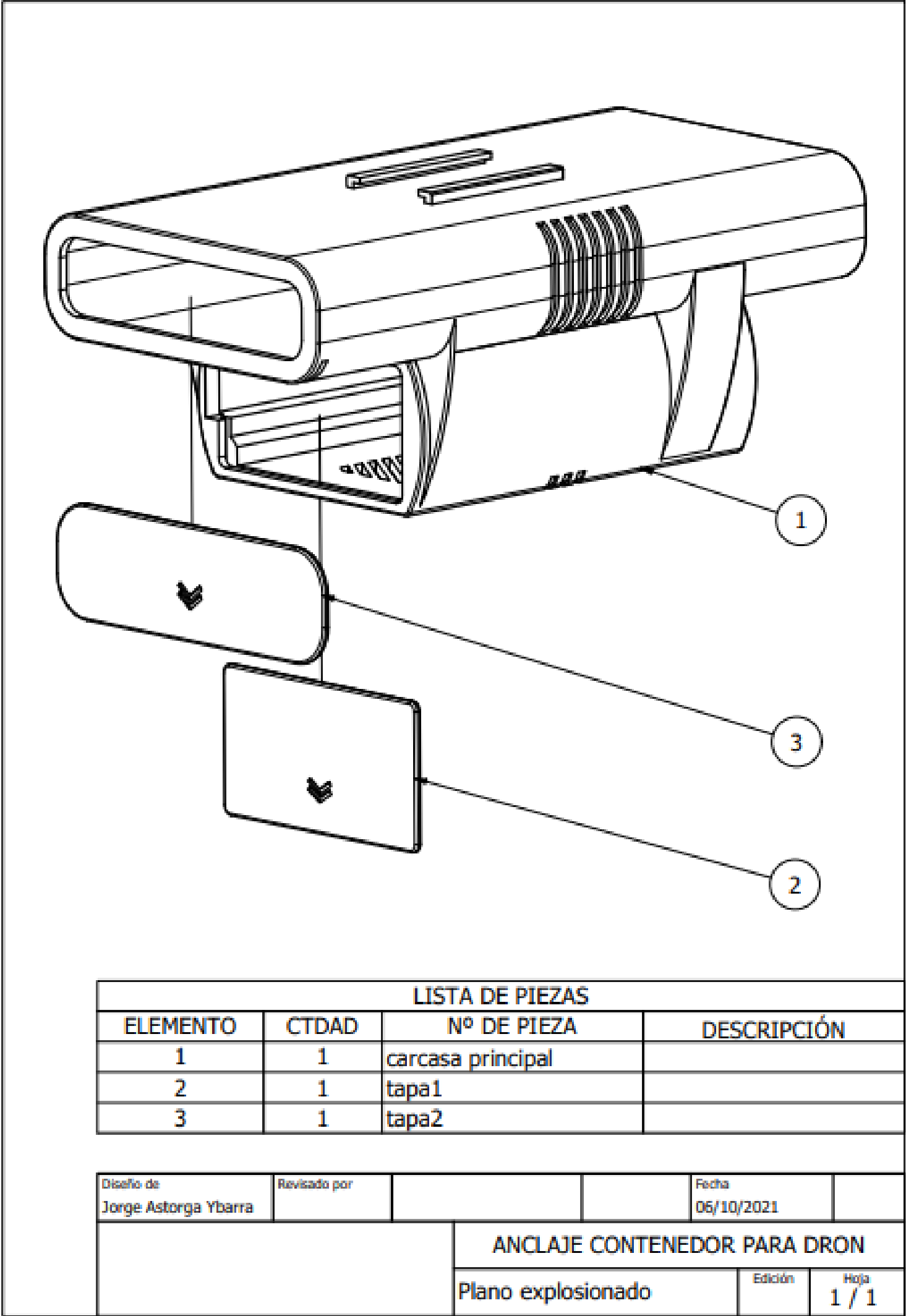


Figura 66: Plano explosionado del soporte de la carga de pago. Fuente: Elaboración propia.

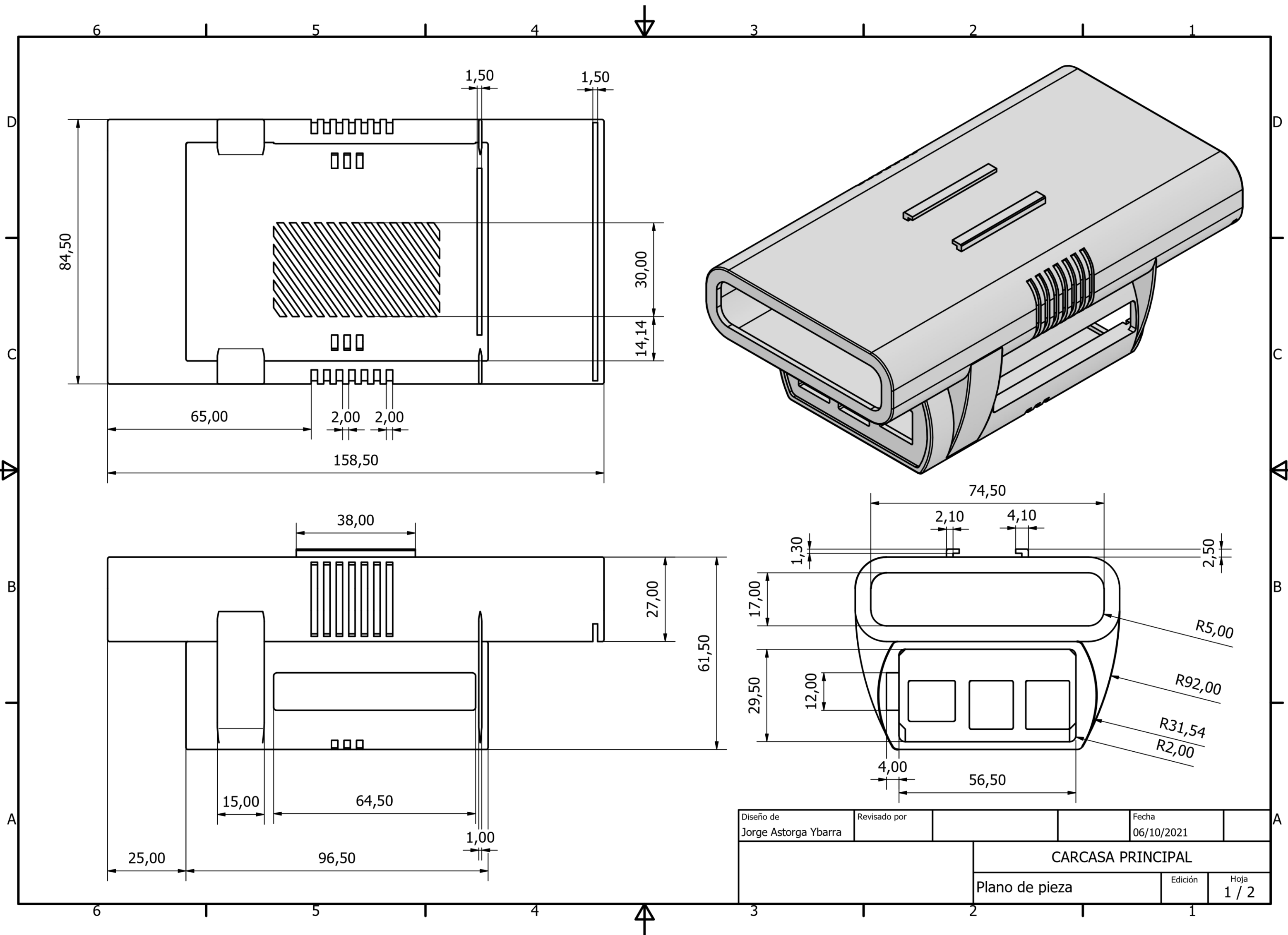


Figura 67: Plano 1 de la carcasa principal. Fuente: Elaboración propia.

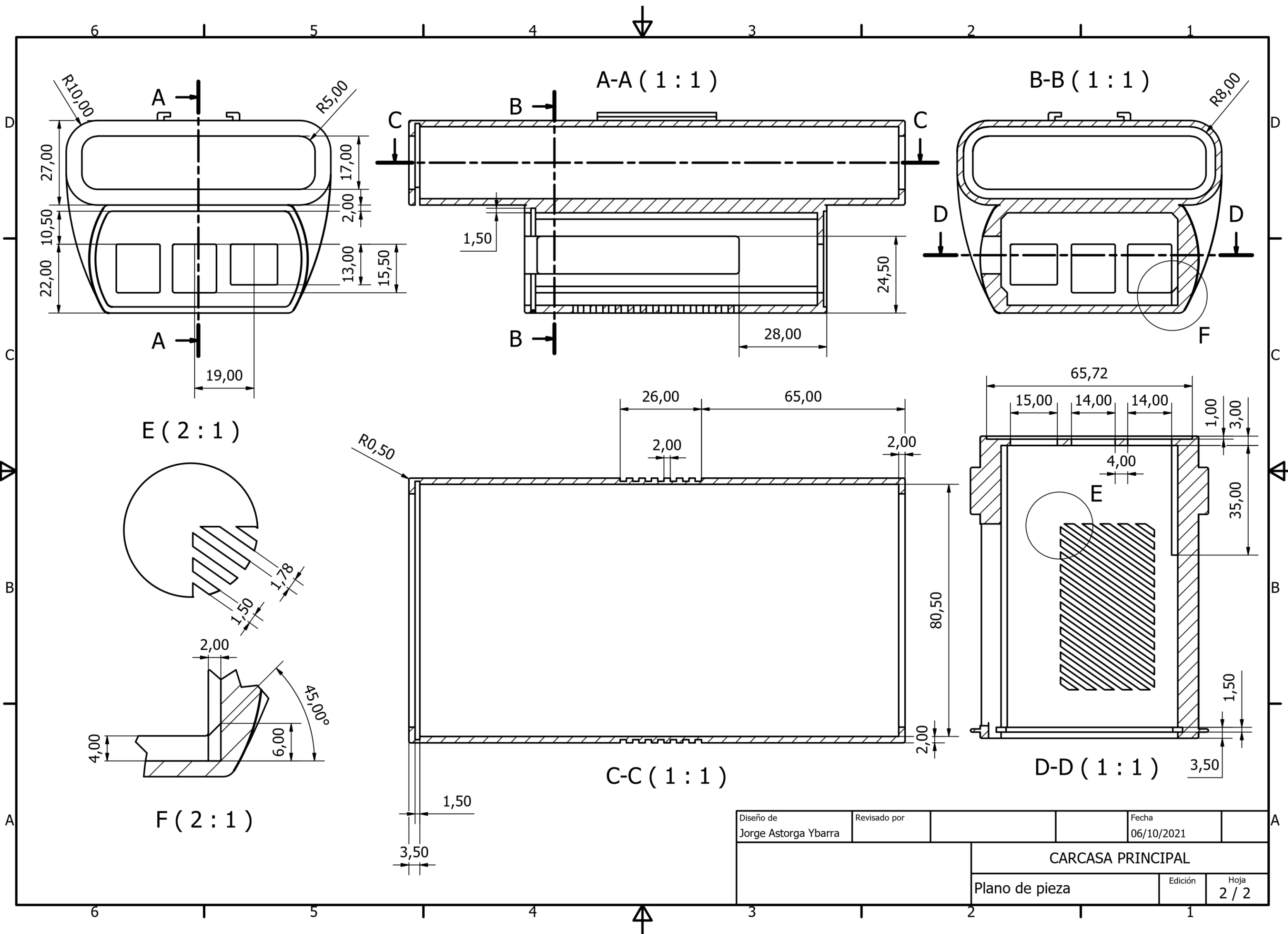


Figura 68: Plano 2 de la carcasa principal. Fuente: Elaboración propia.

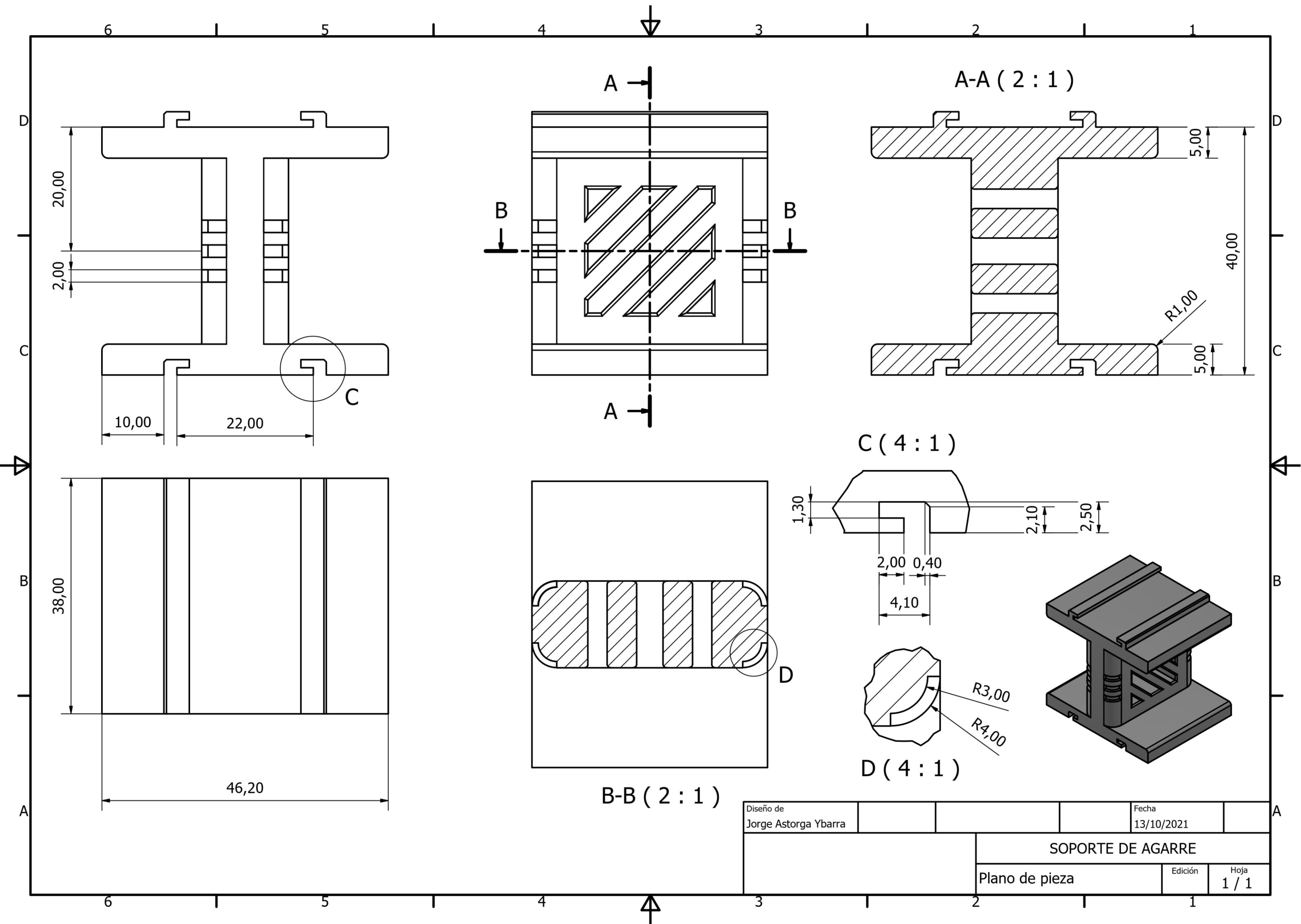


Figura 69: Plano de pieza del soporte de agarre. Fuente: Elaboración propia.

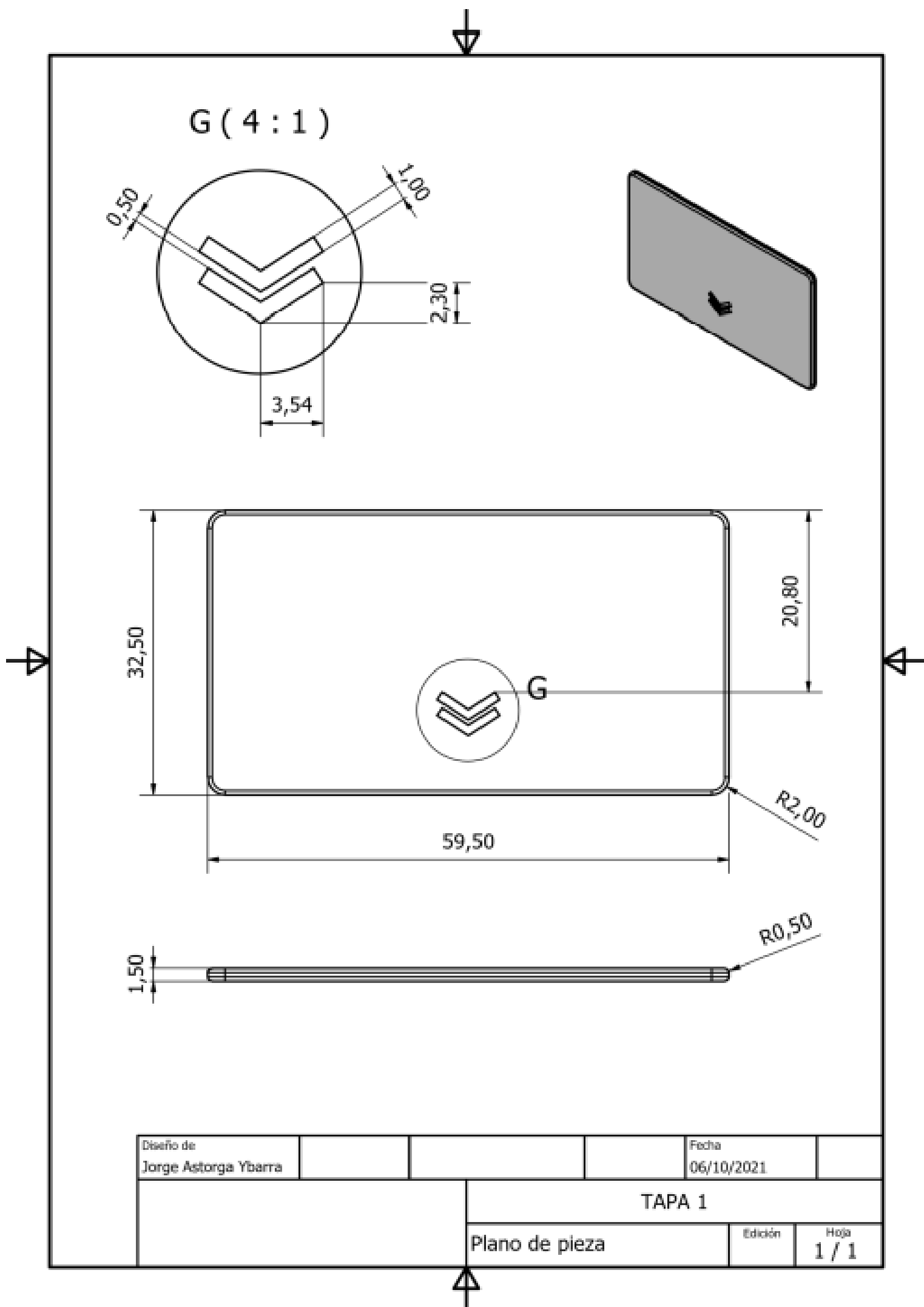


Figura 70: Plano de pieza de la tapa 1. Fuente: Elaboración propia.



Jorge Astorga Ybarra

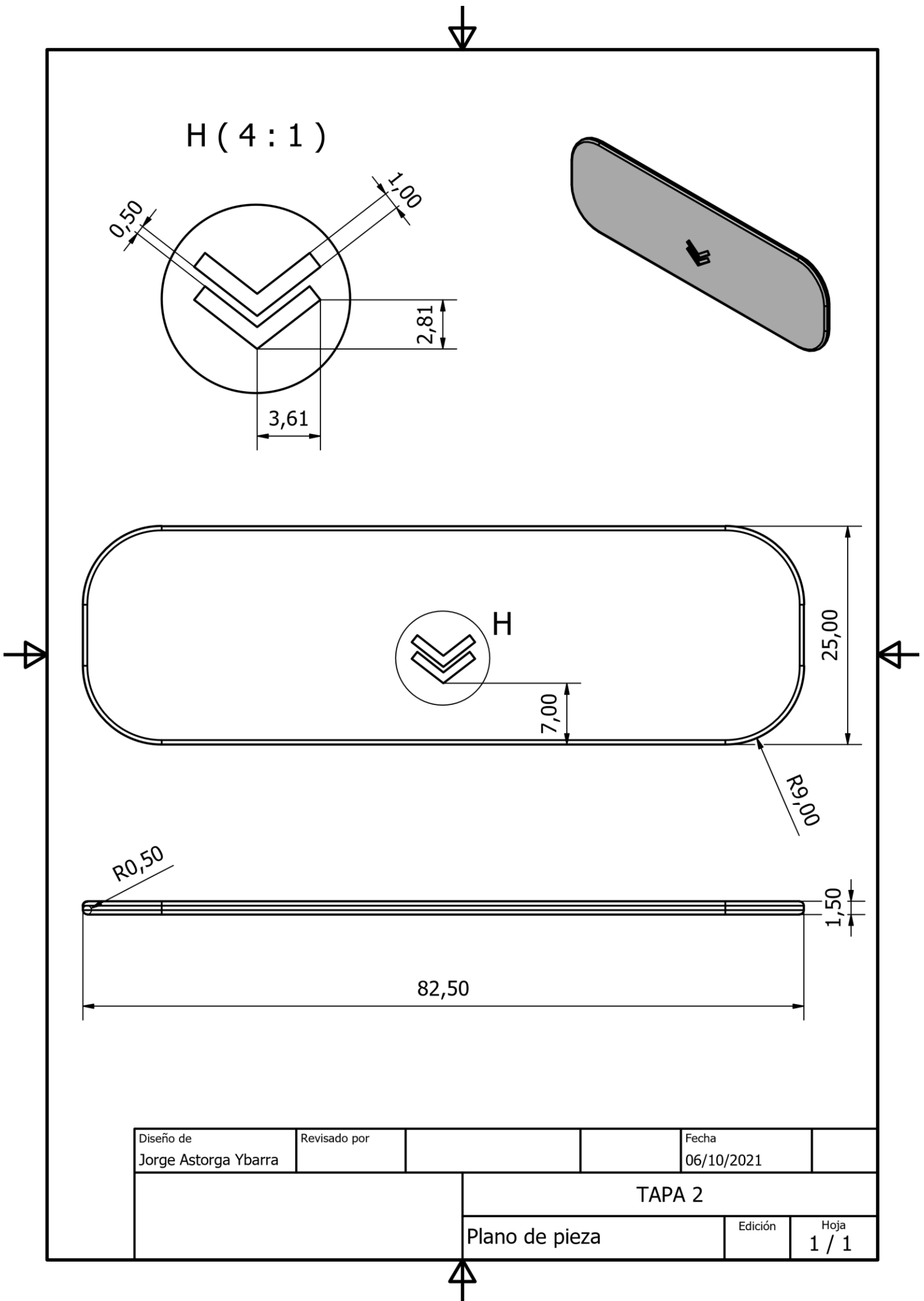


Figura 71: Plano de pieza de la tapa 2. Fuente: Elaboración propia.



Anexo XI: Ficha técnica APPUSB26A.

En la Figura 72 se muestran las especificaciones técnicas de la APPUSB26AC.



Si tienes problemas de cobertura con tu red inalámbrica y tu PC o portátil no logra recibir una buena señal este adaptador USB Wireless es la mejor solución a tus problemas.

Con la APPUSB26AC podrás conectarte exteriormente a redes lejanas en bandas 2,4 GHz y 5 GHz.
¡Descubra redes que parecían inalcanzables!

Especificaciones Técnicas

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

- 802.11 b/g/n/ac
- Hasta 150Mbps 2.4Ghz
- Hasta 433Mbps 5Ghz
- Soporta encriptación WPA-PSK/
- WPA2-PSK WPA/WPA2 64/128 bit
- Cable USB 5m
- Para uso en interiores y exteriores

Sobre el Producto

DIMENSIONES Y PESO

- Dimensiones: 17,5 x 38 x 9 cm
- Peso: 546g aprox.

COLOR Y MATERIAL

- Blanco
- Plástico y metal

GARANTÍA

- 2 Años

Información de Pedido

CONTENIDO DEL PACK

- AppUSB26AC
- Guía rápida de instalación.
- CD de instalación.
- Cable USB 5mts.
- USB Booster
- Soporte.

EMBALAJE

- Tipo: Caja

CÓDIGOS DE BARRAS

- EAN13: 8435099525523
- EAN14: 18435099525520

UNIDADES POR CAJA: 10



Figura 72: Ficha técnica APPUSB26AC. Fuente: (AQPROX communications, 2021a).



Anexo XII: Ficha técnica VK-162 GMOUSE.

En la Figura 73 se muestran las especificaciones técnicas del VK-162 GMOUSE.

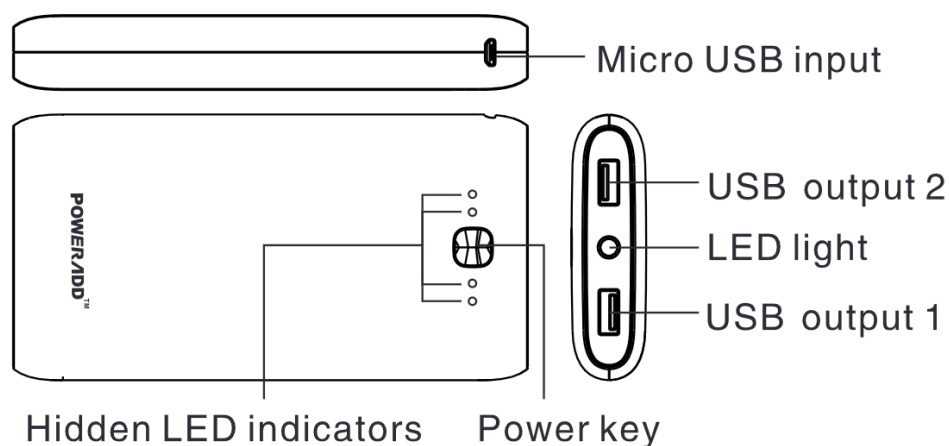
Chipset properties:	Temperature
Main chip: u-blox	Operating : -40°C ~ 80°C
C / A code: 1.023MHz stream	Storage : -40°C ~ 85°C
Receive frequency: L1 [1575.42MHz]	Humidity : < 95% non-condensing
Tracking Channels: 50	Protocol:
Support DGPS [WAAS, EGNOS, and MSAS]	GPS Protocol Default : NMEA 0183
Positioning performance:	GPS Output Data : Command GGA, GSA, GSV, RMC, VTG, GLL
2D plane: 5m [average]	GPS transfer rate : Auto-Baud
2D plane: 3.5m [average], there DGPS auxiliary.	Dimensions:
Drift: <0.02m / s	USB Cable length: 2m
Timing Accuracy: 1us	Size: 49mm x 38mm x 16mm
Reference coordinate system: WGS-84	
Maximum altitude: 18,000m	
Maximum speed: 500m/s	
Acceleration: <4g	
Electrical properties:	
Tracking sensitivity:-162dBm	
Acquisition sensitivity:-148dBm	
Cold start time: 32s [average]	
Warm start Time: 32s [average]	
Hot start time: 1s [average]	
Recapture Time: 0.1s [average]	

Figura 73: Especificaciones técnicas del receptor GPS con salida USB VK-161 GMOUSE. **Fuente:** (Electropeak, 2021)

Anexo XIII: Ficha técnica POWERADD Pilot X7.

En la Figura 74 se muestran las especificaciones técnicas de la POWERADD Pilot X7.

■ Product introduction



■ Specification

Battery Type: Upgraded A+ Li-polymer Battery Cell

Capacity: 20000mAh/74Wh

Input: Micro USB 5V/2A(Max)

Output: 5V/3.4*2 total 5V/3.4A

Dimension: 6.06*3.14*0.84 inch

Weight: 14 oz

Figura 74: Especificaciones técnicas de la batería externa POWERADD Pilot X7. **Fuente:** (POWERADD, 2020).



Anexo XIV: Software propio de SDR empleado en el trabajo.

En las Figuras 75 y 76 se muestran dos capturas de pantalla del programa SDR Sharp. En la primera figura se puede ver el programa SDR Sharp sin *plugins* instalados, y en la segunda el programa SDR Sharp con una suite de *plugins* colocados en una columna en el lado izquierdo de la pantalla.

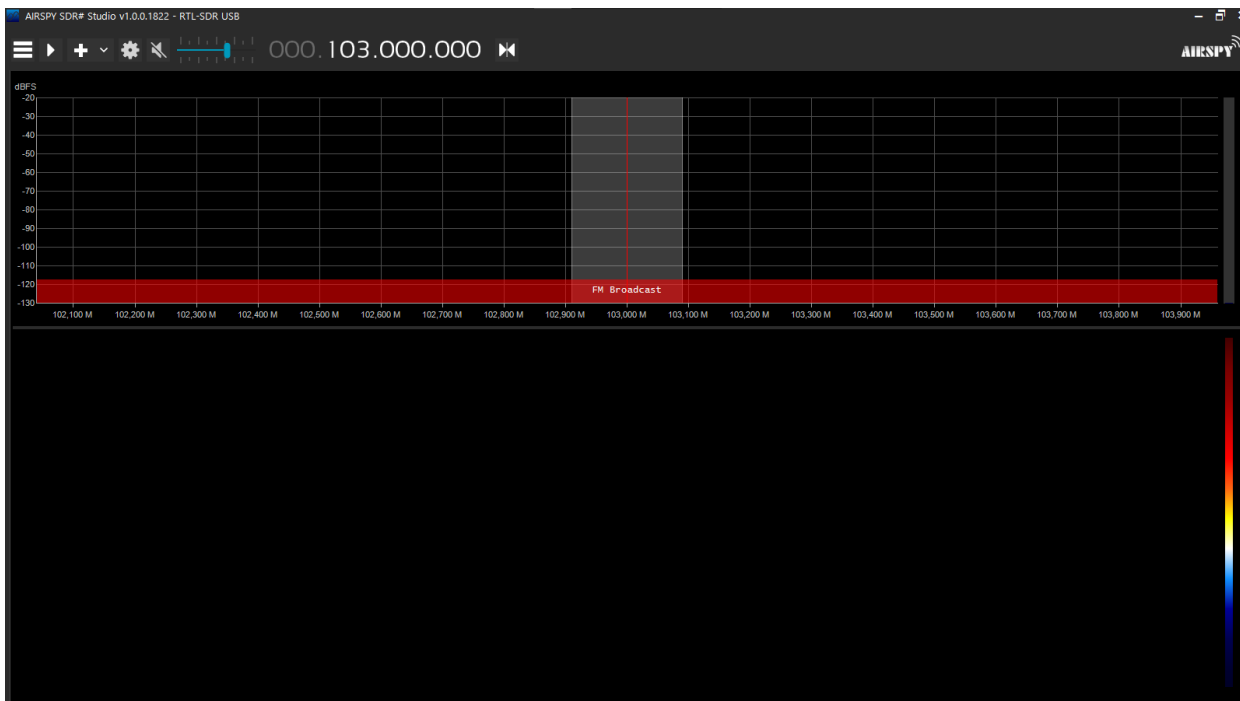


Figura 75: Captura de pantalla del programa SDR Sharp sin *plugins*. **Fuente:** Elaboración propia.

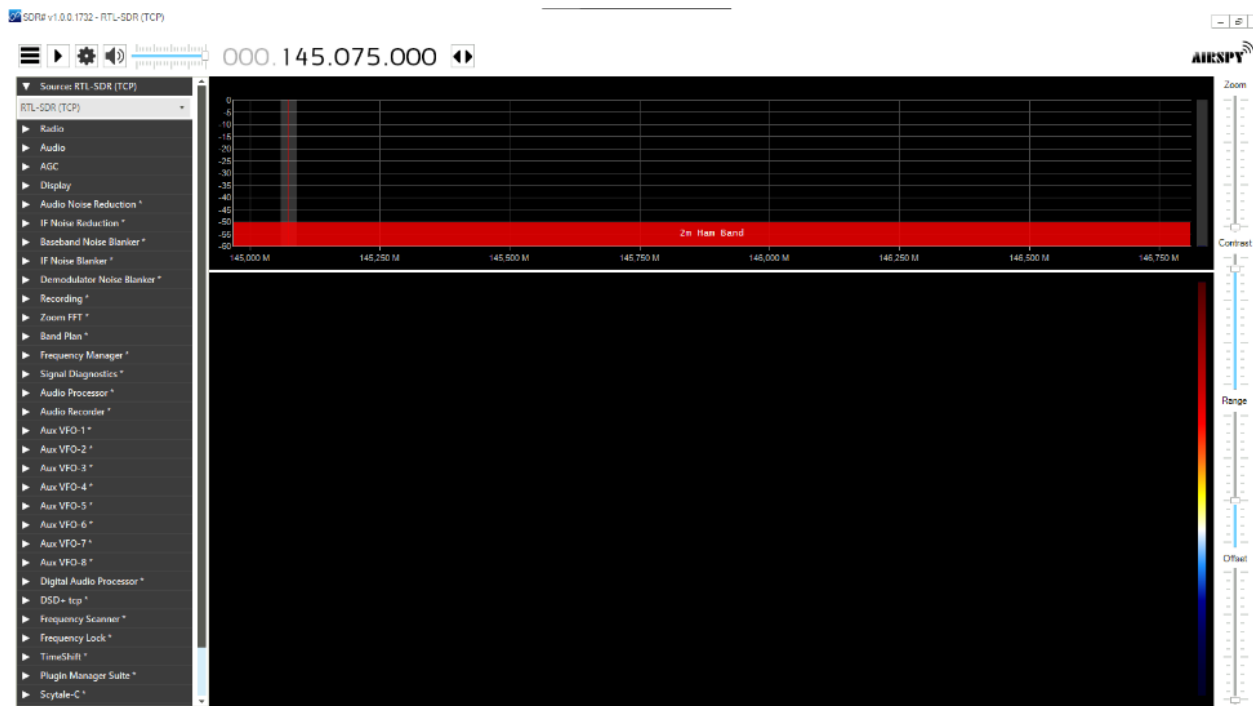


Figura 76: Captura de pantalla del programa SDR Sharp con *plugins* instalados (columna de herramientas a la izquierda). **Fuente:** Elaboración propia.



En la Figura 77, se muestra la pantalla principal del programa RTLSDR Scanner.

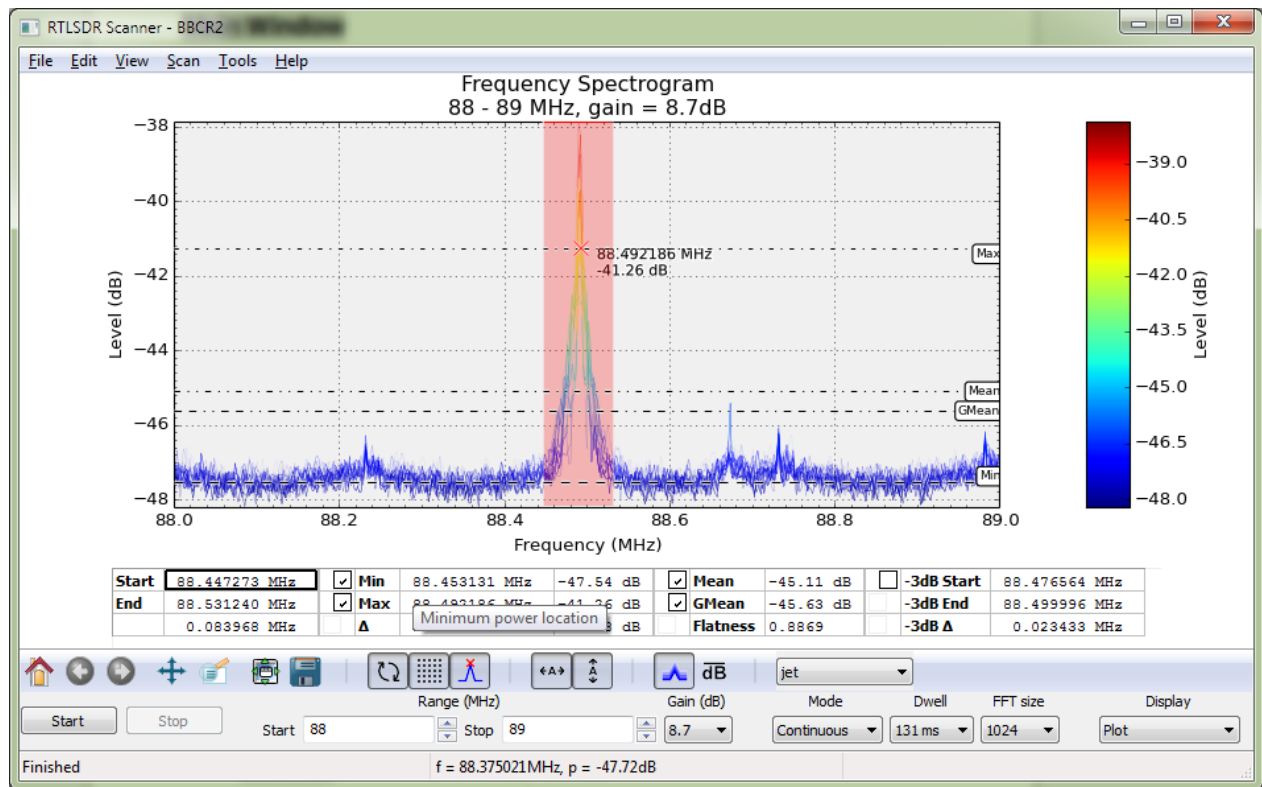


Figura 77: Página principal del programa RTLSDR Scanner. Fuente: (EarToEarOak, 2015b).



Anexo XV: Especificaciones técnicas de los transmisores.

En la Figura 78 se muestran las especificaciones técnicas del transmisor DMR Motorola DP4400.

DP4000 SERIES SPECIFICATIONS

GENERAL SPECIFICATIONS									
		DISPLAY DP4800/DP4801/DP4600/DP4601				NON DISPLAY DP4400/DP4401			
		VHF	350*	UHF#	800**	VHF	350*	UHF#	800**
Channel Capacity		1000				32			
Frequency^		136-174 MHz	350-400 MHz	403-527 MHz	806-870 MHz	136-174 MHz	350-400 MHz	403-527 MHz	806-870 MHz
IMPRES Hi-Cap Li-ion 2150 mAh Battery (PMNN4409)	(HxWxL)	130.3 mm / 55.2 mm / 41.1 mm				130.3 mm / 55.2 mm / 39.6 mm			
	Weight	355.5 g				323 g			
Slim IMPRES Li-ion 1500 mAh Battery (PMNN4407)	(HxWxL)	130.3 mm / 55.2 mm / 35.8 mm				130.3 mm / 55.2 mm / 34.3 mm			
	Weight	335.5 g				303 g			
IMPRES Hi-Cap Li-ion FM 2300 mAh Battery (NNTN8129)	(HxWxL)	130.3 mm / 55.2 mm / 41.1 mm				130.3 mm / 55.2 mm / 39.6 mm			
	Weight	365.5 g				333 g			
Power Supply					7.5 V (Nominal)				
Operating Temperature					-30 ~ +60 °C¹				
FCC Description		ABZ99FT3085	-	ABZ99FT4086	-	ABZ99FT3085	-	ABZ99FT4086	-
IC Description		109AB-99FT3085	-	109AB-99FT4086	-	109AB-99FT3085	-	109AB-99FT4086	-

BATTERY		
Average Battery Life	5/5/90 duty cycle with carrier squelch and transmitter in high power ²	
Slim IMPRES Li-ion 1500 mAh Battery	Analogue: 7.7 hrs/ Digital: 11.3 hrs	Analogue: 8 hrs/ Digital: 11.8 hrs
IMPRES Hi-Cap Li-ion 2150 mAh Battery	Analogue: 11.1 hrs/Digital: 16.2 hrs	Analogue: 11.5 hrs/Digital: 17 hrs
IMPRES Hi-Cap Li-ion FM 2300 mAh Battery	Analogue: 11.9 hrs/Digital: 17.3 hrs	Analogue: 12.3 hrs/Digital: 18.1 hrs

RECEIVER				
	VHF	350	UHF	800
Frequencies	136-174 MHz	350-400 MHz	403-527 MHz	806-870 MHz
Channel Spacing	12.5/25kHz			
Frequency Stability (-30° C, +60° C, +25° C Ref)	± .5 ppm			
Analogue Sensitivity (12dB SINAD)	0.3uV (0.22uV typical)			
Digital Sensitivity	0.25 uV (0.19 uV typical)			
Intermodulation (TIA603D)	70 dB			
Adjacent Channel Selectivity (TIA603A)-1T	60dB @ 12.5 kHz / 70dB @ 25 kHz			
Adjacent Channel Selectivity (TIA603D)-2T	45dB @ 12.5 kHz / 70dB @ 25 kHz			
Spurious Rejection (TIA603D)	70 dB			
Rated Audio	0.5W			
Audio Distortion @ Rated Audio	5% (3% typical)			
Hum and Noise	-40dB @ 12.5 kHz / -45dB @ 25 kHz			
Audio Response	TIA603D			
Conducted Spurious Emission (TIA603D)	-57dBm			

TRANSMITTER				
	VHF	350	UHF	800
Frequencies	136-174 MHz	350-400 MHz	403-527 MHz	806-870 MHz
Channel Spacing	12.5/25 kHz			
Frequency Stability	± .5 ppm			
Low Power Output	1W	1W	1W	1W
High Power Output	5W	4W	4W/2.5W	4W/2.5W
Modulation Limiting	± 2.5kHz @ 12.5 kHz / ± 5.0kHz @ 25 kHz			
FM Hum and Noise	-40dB@ 12.5 kHz / -45dB@ 25 kHz			
Conducted/Radiated Emission	-36 dBm < 1GHz / -30 dBm > 1GHz			
Adjacent Channel Power	60dB @ 12.5 kHz / 70dB @ 25 kHz			
Audio Response	TIA603D			
Audio Distortion	3%			
4FSK Digital Modulation	12.5 kHz Data: 7K60F1D & 7K60FXD			
	12.5 kHz Voice: 7K60F1E & 7K60FXE			
	Combination of 12.5 kHz Voice & Data: 7K60F1W			
Digital Vocoder Type	AMBE+2™			
Digital Protocol	ETSI TS 102 361-1, -2, -3			



DESARROLLO E INSTALACIÓN DE UNA CARGA DE PAGO DE GUERRA ELECTRÓNICA BASADA EN RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE SOBRE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS PARA REALIZAR MEDIDAS DE APOYO ELECTRÓNICO



Jorge Astorga Ybarra

GPS

Accuracy specs are for long-term tracking (95th percentile values>5 satellites visible at nominal -130 dBm signal strength)

TTFF (Time To First Fix) - Cold Start	< 60 seconds
TTFF (Time To First Fix) - Hot Start	< 10 seconds
Horizontal Accuracy	< 5 meters

BLUETOOTH

Version	Supports Bluetooth® 2.1 + EDR Specification
Range	Class 2, 10 meters

ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS

Operating Temperature	-30° C / +60° C
Storage Temperature	-40° C / +85° C
Thermal Shock	Per MIL-STD
Humidity	Per MIL-STD
ESD	IEC 61000-4-2 Level 3
Dust and Water Intrusion	IEC 60529 - IP57
Packaging test	MIL-STD 810D and E

Testing completed using portable radio with attached battery and antenna.

FACTORY MUTUAL APPROVALS

MOTOTRBO™ DP4000 Series portable radios have been certified by FM in accordance with U.S. Codes as intrinsically safe for use in Class I, II, III, Division 1, Groups C, D, E, F, G, when properly equipped with a Motorola FM approved battery option. They are also approved for use in Class I, Division 2, Groups A, B, C, D.

MILITARY STANDARDS

	810C		810D		810E		810F		810G	
APPLICABLE MIL-STD	METHOD	PROCEDURES	METHOD	PROCEDURES	METHOD	PROCEDURES	METHOD	PROCEDURES	METHOD	PROCEDURES
Low Pressure	500.1	I	500.2	II	500.3	II	500.4	II	500.5	II
High Temperature	501.1	I, II	501.2	I/A1, II/A1	501.3	I/A1, II/A1	501.4	I/Hot, II/Hot	501.5	I-A1, II
Low Temperature	502.1	I	502.2	I/C3, II/C1	502.3	I/C3, II/C1	502.4	I-C3, II/C1	502.5	I, II
Temperature Shock	503.1	-	503.2	I/A1/C3	503.3	I/A1/C3	503.4	I	503.5	I-C
Solar Radiation	505.1	II	505.2	I	505.3	I	505.4	I	505.5	I-A1
Rain	506.1	I, II	506.2	I, II	506.3	I, II	506.4	I, III	506.5	I, III
Humidity	507.1	II	507.2	II	507.3	II	507.4	-	507.5	II
Salt fog	509.1	-	509.2	-	509.3	-	509.4	-	509.5	-
Dust	510.1	I	510.2	I	510.3	I	510.4	I	510.5	I
Vibration	514.2	VIII/F, Curve-W	514.3	I/10, II/3	514.4	I/10, II/3	514.5	I/24	514.6	II/5
Shock	516.2	I, II	516.3	I, IV	516.4	I, IV	516.5	I, IV	516.6	I, IV, VI

For more information on how to strengthen your portable voice,
visit motorolasolutions.com.au

Specifications subject to change without notice. All specifications shown are typical.

Radio meets applicable regulatory requirements.

Motorola Solutions Australia Pty Limited

The information presented herein is to the best of our knowledge true and accurate. No warranty or guarantee expressed or implied is made regarding the capacity, performance or suitability of any product. MOTOROLA, MOTO, MOTOROLA SOLUTIONS and the Stylised M Logo are trademarks or registered trademarks of Motorola Trademark Holdings, LLC and are used under license. All other trademarks are the property of their respective owners. © 2014 Motorola Solutions, Inc. All rights reserved. BTB/MA693-DP4000 11/14

MOTOTRBO
DIGITAL
REMASTERED.



Figura 78: Especificaciones técnicas del Motorola DP4400. Fuente: (MOTOROLA, 2021).



En la Figura 79 se muestran las características del transmisor analógico Baofeng UV-5R.

<ul style="list-style-type: none">• Walkie talkie portátil de doble-banda con menú de funciones de visualización en la pantalla "LCD"• Con codificación DTMF• Batería de Ión- Litio de alta capacidad• Receptor de radio comercial en FM (65 MHz - 108 MHz)• Incorpora 105 códigos "DCS" y 50 códigos de privacidad «CTCSS» programables• Función «VOX» (transmisión activada por voz)• Función de alarma• Hasta 128 canales en memoria• Posibilidad de seleccionar Banda Ancha (Wide) o Estrecha (Narrow)• Posibilidad de seleccionar alta potencia o baja potencia de transmisión (5W/ 1W)• Función pitido "beep" en el teclado• Escucha dual/ recepción dual	<ul style="list-style-type: none">• Posibilidad de seleccionar los pasos de frecuencia de 2.5 /5/6.25/10/12.5/25 kHz• Función "OFFSET" (desplazamiento de la frecuencia de acceso del repetidor)• Función de ahorro de batería "SAVE"• Tiempo de transmisión "TOT" programable• Selección de Modo Escáner• Función de bloqueo de canal ocupado "BCLO"• Escáner de recepción CTCSS/ DCS integrado• Luz flash tipo LED integrada• Programable por PC• Nivel del Umbral "Silenciador" ajustable desde 0 a 9• Operación en bandas cruzadas "Crossband"• Tono de fin de transmisión• Tecla de bloqueo integrada
<p>El pack incluye:</p> <p>Caja y manual de instrucciones.</p> <p>Walkie talkie Baofeng uv-5r</p> <p>Batería de 1800 mha</p> <p>Clip para cuelge de cinturon</p> <p>Base de carga</p> <p>Cargador de pared</p> <p>Correa de sujeccion</p> <p>Antena segun etiquetado seleccionado.</p> <p>Auricular piganillo de regalo</p>	

Figura 79: Características del Baofeng UV-5R. **Fuente:** (Baofeng, 2021)



Anexo XVI: Parámetros introducidos en Radio Mobile.

En la Figura 80 se muestra la pantalla principal del programa Radio Mobile.



Figura 80: Pantalla principal de Radio Mobile. **Fuente:** Elaboración propia.

Los primeros datos que se añadieron a la herramienta fueron las dos ubicaciones del sistema de comunicaciones. En el centro del patio de armas del acuartelamiento Zarco del Valle (REW31), donde se ubicó el dron junto con la carga de pago. El transmisor estaba colocado en el centro de campo de fútbol sala del mismo cuartel. En las Figuras 81 y 82 podemos ver ambas ubicaciones.

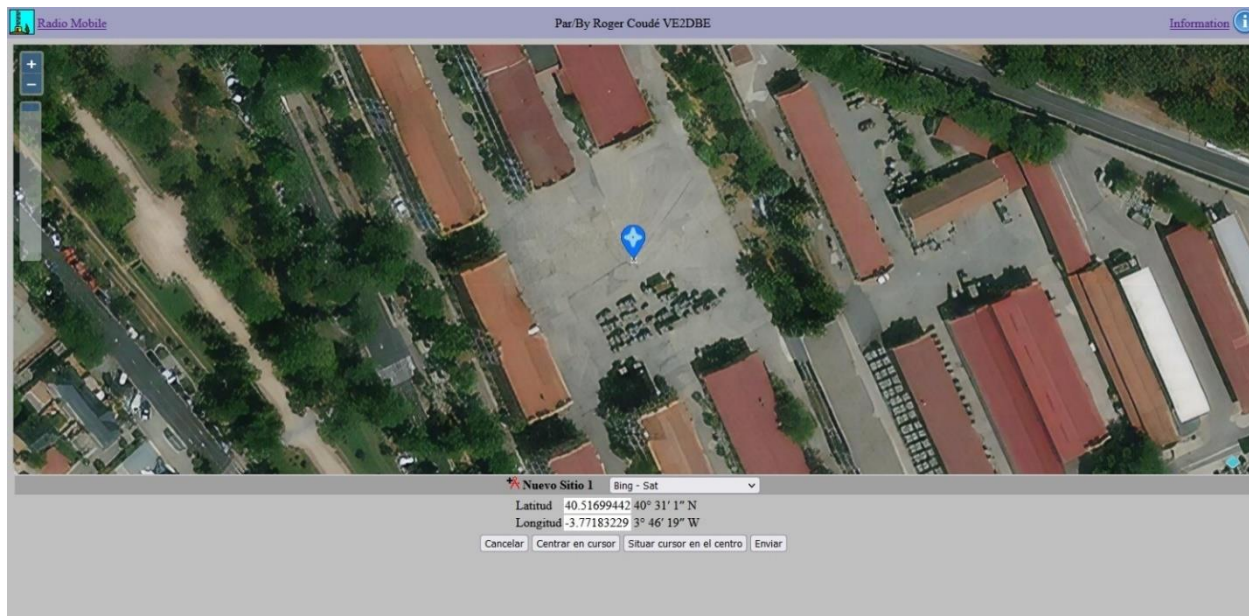


Figura 81: Ubicación del dron en la prueba de potencia. **Fuente:** Elaboración propia.

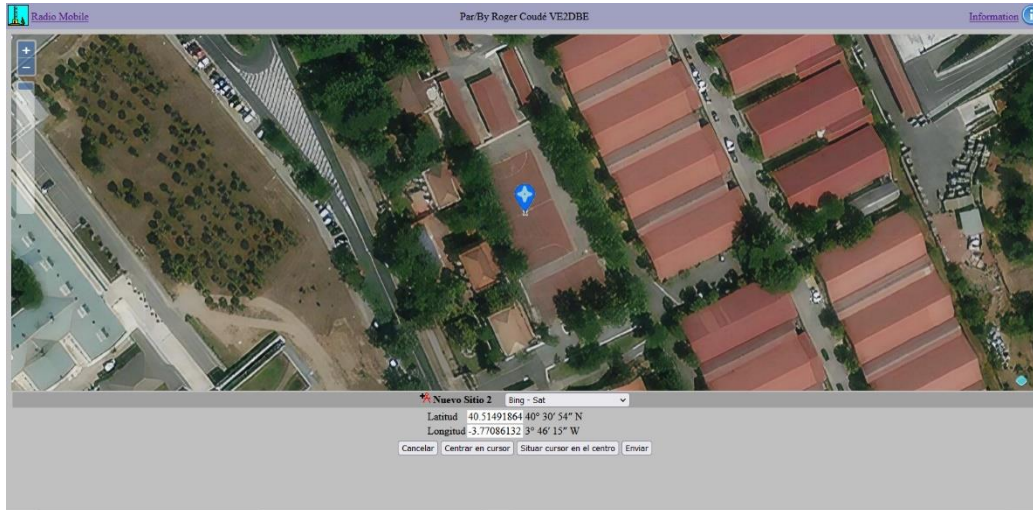


Figura 82: Ubicación del transmisor en la prueba de potencia. **Fuente:** Elaboración propia.

Una vez se introducen las dos ubicaciones, solo hace falta introducir los datos de los parámetros que nos pide el programa. En la Figura 83, podemos ver los parámetros que solicita. Los parámetros que no son influyentes para nuestro estudio han sido ocultados bajo un fondo negro.

Figura 83: Parámetros solicitados por Radio Mobile online para realizar la simulación. **Fuente:** Elaboración propia.

- Altura de la antena transmisora: se tomó como valor 1,8 m siendo, la altura de la persona que se encontraba con el transmisor.
- Altura de la antena receptora: fue la altura a la que se encontraba la carga de pago, que empezó en 10 m, hasta los 100m, aumentando la altura 10 m cada vez que finalizaba la recogida de datos.
- Frecuencia: la frecuencia de trabajo del transmisor.
- Potencia del transmisor: potencia máxima del transmisor según el anexo. La potencia de ambos fue de 5 W.
- Pérdida de la línea en el transmisor y en el receptor: se asumió que no había pérdidas tanto en el transmisor como en el receptor, ya que se desconocía su dato.
- Ganancia de la antena en el receptor: se asumió de 2,15 dBi. Según la ITU, la ganancia de una antena dipolo de media onda en espacio libre es de 2,15 dBi (UIT, 1999).
- Ganancia de la antena en el transmisor: se asumió para ambos transmisores, una ganancia de la antena de 2 dBi, por ser una ganancia típica de este tipo de antenas.



Anexo XVII: Tabla con resultados experimentales y simulaciones obtenidas en Radio Mobile Online.

En este anexo se muestra en una tabla los resultados obtenidos tanto experimentalmente, como mediante Radio Mobile Online sobre la prueba de potencia de señal recibida. En la Figura 84, podemos ver el formato que tiene el programa al mostrarnos las simulaciones.

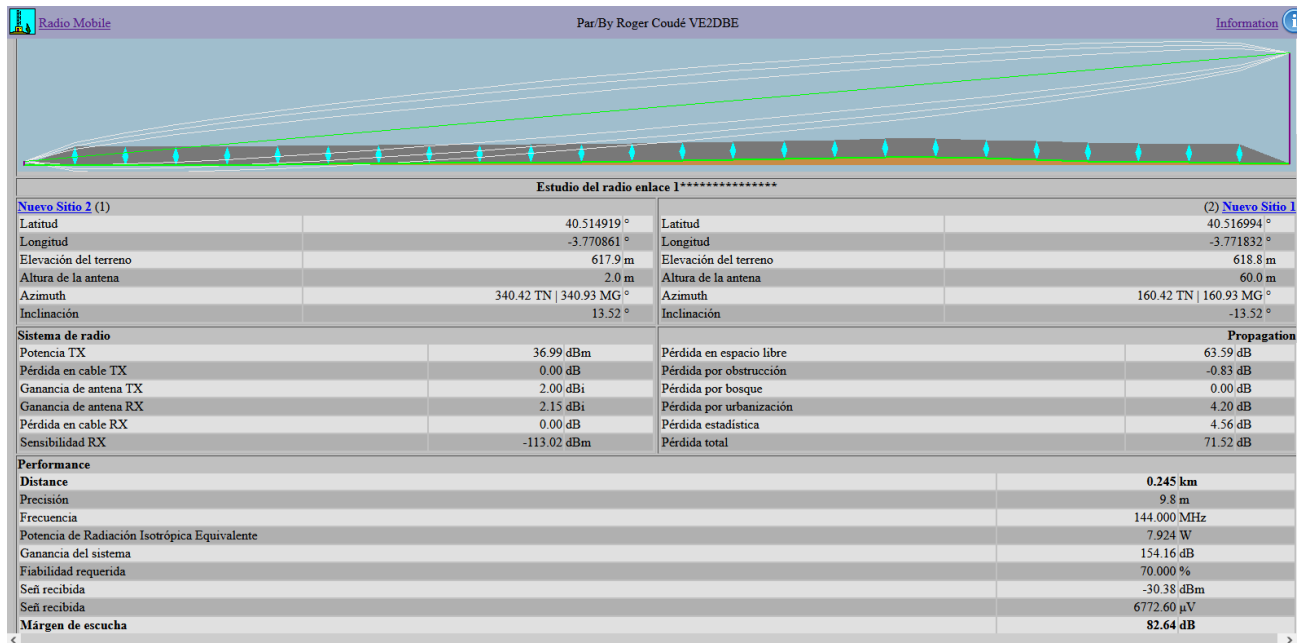


Figura 84: Pantalla con resultados obtenido de una simulación de radioenlace en Radio Mobile Online.

Fuente: Elaboración propia.

Transmisor analógico Baofeng UV-5R (144 MHz)		
Altura de la carga de pago (m)	Simulación en Radio Mobile Online (dBm)	SDR Sharp (dBm)
10	-47,32	-48,47
20	-38,94	-40,54
30	-33,97	-35,30
40	-31,06	-32,91
50	-29,85	-31,44
60	-28,87	-30,46
70	-28,74	-30,02
80	-27,91	-29,85
90	-28,43	-30,19
100	-28,98	-30,64

Tabla II: Resultados de la prueba de potencia con SDR Sharp y la simulación de Radio Mobile para el transmisor analógico Baofeng UV-5R a 144 MHz. Fuente: Elaboración propia.



Transmisor analógico Baofeng UV-5R (430 MHz)		
Altura de la carga de pago (m)	Simulación en Radio Mobile Online (dBm)	SDR Sharp (dBm)
10	-61,76	-63,29
20	-52,12	-53,68
30	-45,65	-47,31
40	-44,13	-45,87
50	-42,67	-44,15
60	-39,45	-41,94
70	-39,23	-41,54
80	-40,16	-42,29
90	-38,67	-40,93
100	-38,34	-40,59

Tabla III: Resultados de la prueba de potencia con SDR Sharp y la simulación de Radio Mobile para el transmisor analógico Baofeng UV-5R a 144 MHz. **Fuente:** Elaboración propia.

Transmisor digital DMR Motorola DP4400 (148 MHz)		
Altura de la carga de pago (m)	Simulación en Radio Mobile Online (dBm)	SDR Sharp (dBm)
10	-47,12	-48,85
20	-39,23	-40,82
30	-33,89	-35,57
40	-32,57	-33,17
50	-29,78	-31,69
60	-28,71	-30,73
70	-28,56	-30,32
80	-28,35	-30,20
90	-28,77	-30,57
100	-29,43	-31,02

Tabla IV: Resultados de la prueba de potencia con SDR Sharp y la simulación de Radio Mobile para el transmisor digital tipo DMR Motorola DP4400 a 148 MHz. **Fuente:** Elaboración propia.



Transmisor digital DMR Motorola DP4400 (440 MHz)		
Altura de la carga de pago (m)	Simulación en Radio Mobile Online (dBm)	SDR Sharp (dBm)
10	-62,11	-63,63
20	-52,23	-53,98
30	-45,98	-47,65
40	-44,32	-46,19
50	-42,66	-44,27
60	-40,34	-42,10
70	-40,19	-41,95
80	-41,85	-42,57
90	-39,76	-40,91
100	-40,14	-41,06

Tabla V: Resultados de la prueba de potencia con SDR Sharp y la simulación de Radio Mobile para el transmisor digital tipo DMR Motorola DP4400 a 440 MHz. **Fuente:** Elaboración propia.



Anexo XVIII: Gráficas sobre la variación de potencia con la altura del UAV obtenidas y script utilizado con MATLAB.

El script utilizado para graficar los resultados de la prueba de variación de potencia en MATLAB es el siguiente:

```
x = [10 20 30 40 50 60 70 80 90 100];  
y1 = [(-63.63) (-53.98) (-47.65) (-46.19) (-44.27) (-42.10) (-41.95) (-42.57)  
(-40.91) (-41.06)];  
y2 = [(-62.11) (-52.23) (-45.98) (-44.32) (-42.66) (-40.34) (-40.19) (-41.85)  
(-39.76) (-40.14)];
```

```
plot(x,y1,x,y2)  
xlabel('Altura del UAV')  
ylabel('Potencia de la señal recibida (dBm)')  
title('Transmisor digital DMR Motorola DP4400 (440 MHz)')  
legend('SDR Sharp', 'Simulación de Radio Mobile' )
```

Este script, pertenece en concreto a la prueba que se realiza con el transmisor digital tipo DMR Motorola DP4400 a 440 MHz.

En las Figuras 85, 86, 87 y 88, se muestran las gráficas de todas las pruebas que se realizaron sobre la variación de potencia con la altura del dron.

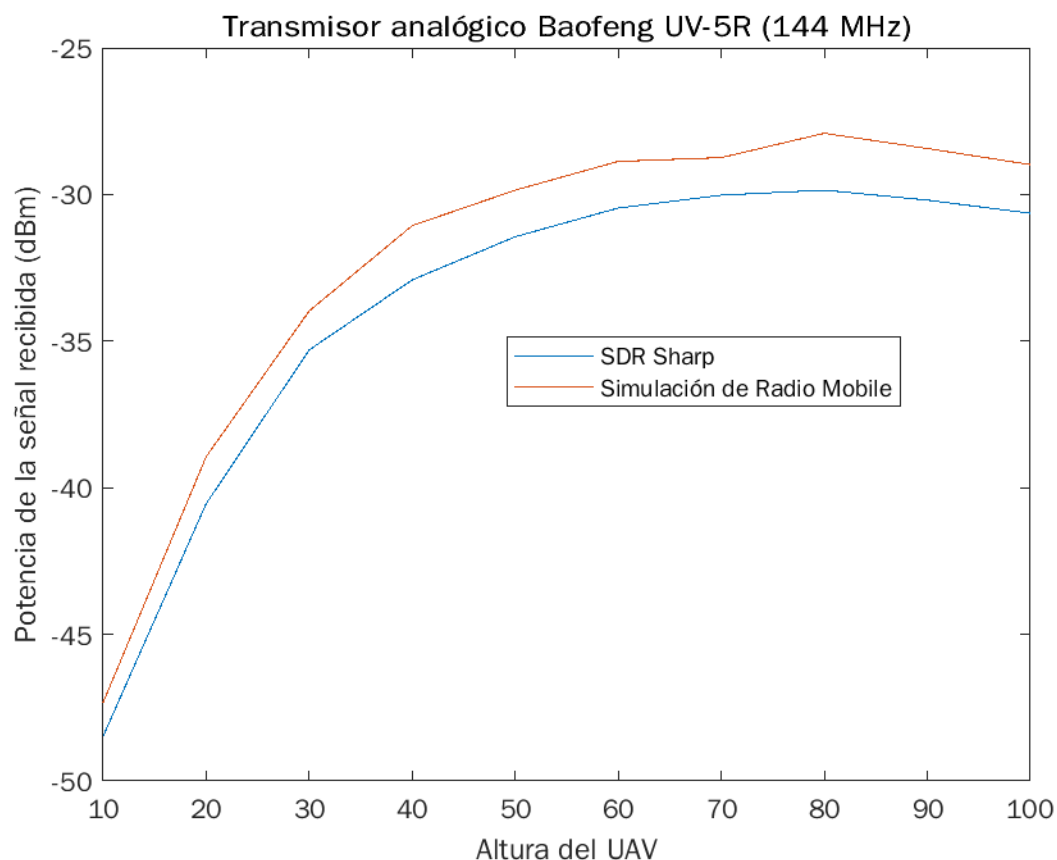


Figura 85: Prueba de potencia con el transmisor analógico Baofeng UV-5R a 144 MHz. **Fuente:** Elaboración propia.

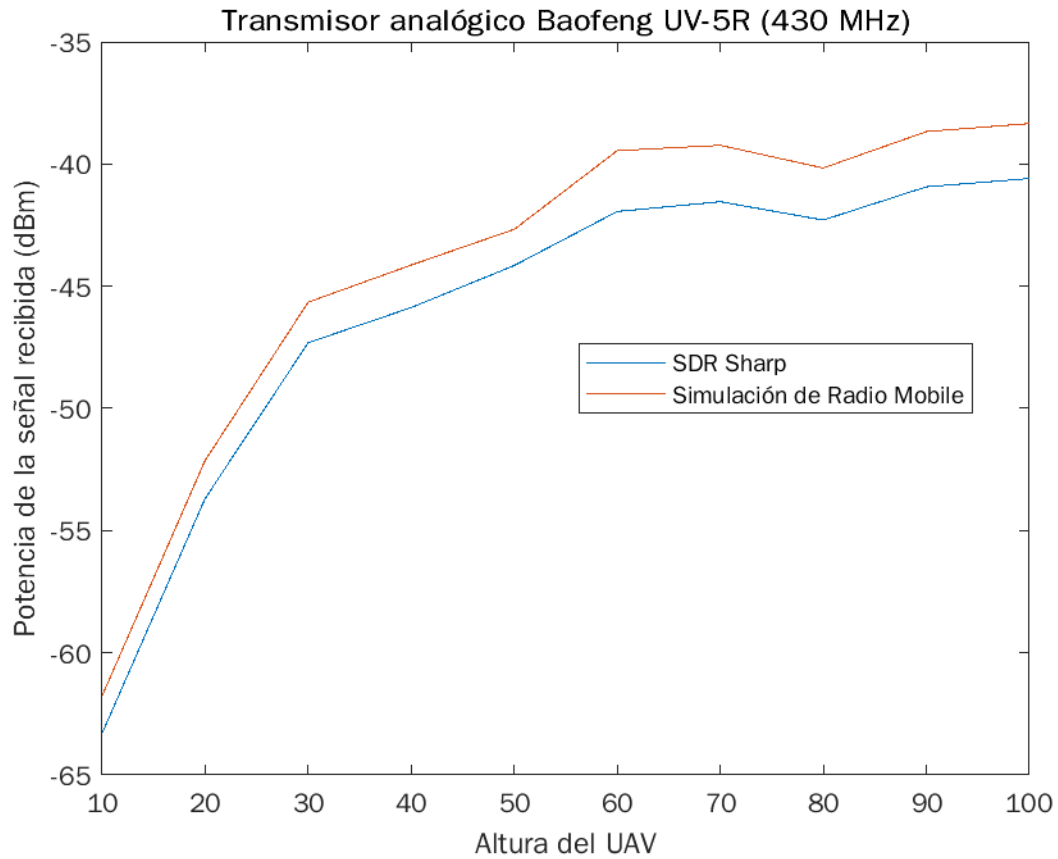


Figura 86: Prueba de potencia con el transmisor analógico Baofeng UV-5R a 430 MHz. **Fuente:** Elaboración propia.

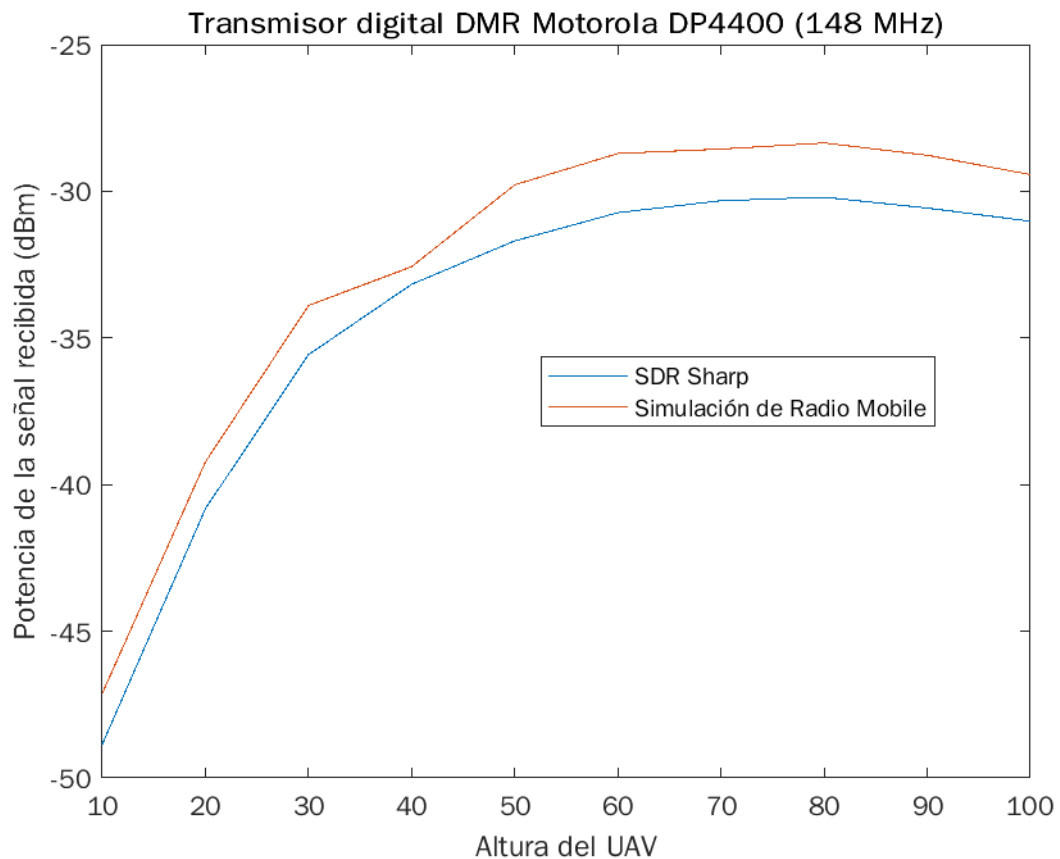


Figura 87: Prueba de potencia con el transmisor digital tipo DMR Motorola DP4400 a 148 MHz. **Fuente:** Elaboración propia.

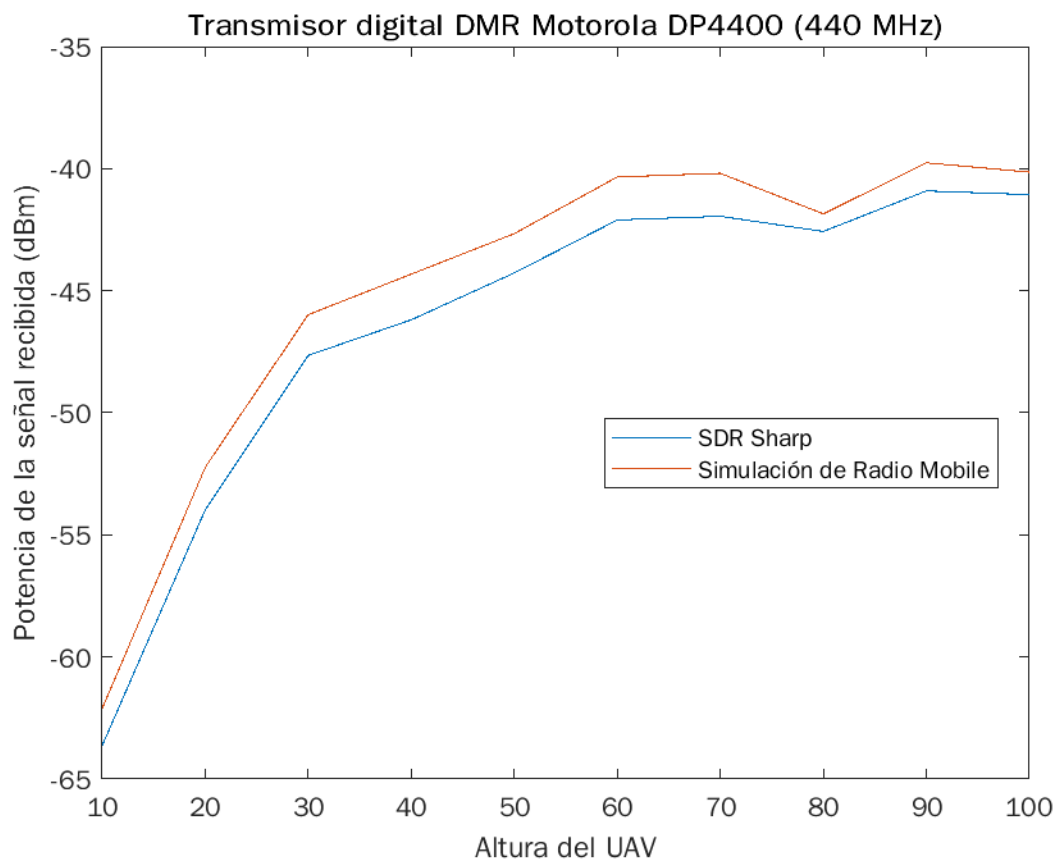


Figura 88: Prueba de potencia con el transmisor digital tipo DMR Motorola DP4400 a 440 MHz. **Fuente:** Elaboración propia.