

Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Diseño de una estación terrena de bajo coste para la recepción de señales de CubeSats con tecnología LoRa

Autora: Alejandra Reinoso Sánchez

Tutora: María José Madero Ayora

**Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2025



Trabajo Fin de Grado
en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Diseño de una estación terrena de bajo coste para la recepción de señales de CubeSats con tecnología LoRa

Autora:

Alejandra Reinoso Sánchez

Tutora:

María José Madero Ayora

Profesor titular

Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2025

Trabajo Fin de Grado: Diseño de una estación terrena de bajo coste para la recepción de señales de CubeSats
con tecnología LoRa

Autora: Alejandra Reinoso Sánchez

Tutora: María José Madero Ayora

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2025

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

A mis amigos

Agradecimientos

Este documento no es más que el resultado de todos estos años de aprendizaje y con el que pongo un broche final a esta etapa en la que he tenido la suerte de conocer a personas maravillosas que han hecho que estos años hayan merecido la pena y que siempre recordaré con añoranza. Es por ello que quiero dedicarles unas palabras que espero que reflejen todo lo que significan para mí ya que sin ellos esto no hubiera sido posible.

A mi familia, especialmente a mi madre, Carmen, por todos los esfuerzos y apoyos que me han ofrecido durante estos años, siempre creyendo en mí bajo cualquier circunstancia y que espero poder devolver algún día.

A todos los profesores que he tenido el placer de conocer, por su paciencia y la ayuda incondicional que siempre me han proporcionado. En especial a María José, profesora, tutora de este TFG y sobre todo amiga, a la que estoy eternamente agradecida por haberme apoyado, guiado, enseñado y ayudado siempre que lo necesitaba con tanta dedicación.

A Arturo (EA7KE) y a Jorge (EA1FWI) por haberme inculcado y enseñado innumerables aspectos relacionados con la radioafición y por haberme ayudado con tanto cariño y dedicación siempre que lo he necesitado.

A mi profesor de Violín Charly, cuyos ratos durante las clases eran una desconexión necesaria que me ayudaba a seguir estudiando con más fuerza.

A mi amiga Elsa, por toda la paciencia que ha tenido conmigo tras los infinitos intentos de quedar y hacer planes que muchos eran rechazados por tener que estudiar. Agradecida por los que sí fueron posibles ya que eran de los momentos más felices entre horas y horas de estudios.

A mis compañeros, por haberme acompañado en este viaje, especialmente a Enrique, David, Salva y María. Sois de lo mejor que me ha ofrecido la Universidad. Muchas gracias por haber hecho este camino mucho más ameno y divertido, y estoy segura de que seguiremos viviendo muchos momentos a lo largo de esta vida.

Por último, en especial mención a Fer, mi apoyo incondicional durante estos años, quien ha creído en mí en todo momento incluso ni cuando yo misma lo hacía, quien ha dedicado tantas horas a ayudarme anteponiéndolo todo y quien me ha sacado una sonrisa en los peores momentos. Sin ti esto no hubiera sido posible, eternamente agradecida.

Alejandra Reinoso Sánchez

Sevilla, 2025

Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado se presenta el diseño, simulación y construcción de una estación base autosuficiente y de bajo coste que reciba telemetría de satélites integrando la solución de TinyGs.

En el mercado hay múltiples opciones de compra de los distintos elementos que conforman una estación base, por lo que en este documento se han investigado y usado los mismos e incluso se ha llegado a construir una antena propia con la finalidad de detallar los distintos pasos a seguir para tener como resultado una estación base sencilla, económica y funcional.

A lo largo del documento se detallará la teoría que hay detrás de las comunicaciones satelitales incluyendo conceptos como el New Space y la gestión del espectro radioeléctrico en España, de la tecnología LoRa, de la plataforma TinyGS así como del proceso de diseño, construcción y validación de la estación.

Abstract

This Final Degree Project presents the design, simulation, and construction of a self-sufficient and low-cost ground station intended for satellite telemetry reception. The system integrates the open-source TinyGS platform as its core communication solution.

The market offers multiple options for purchasing the various components that make up a ground station. Therefore, this work explores and employs several of these components and even includes the construction of a custom-built antenna. The aim is to document and describe in detail the different steps required to obtain a simple, cost-effective, and functional ground station.

Throughout this document, the theoretical background behind satellite communications is discussed, including concepts such as New Space, the management of the radio spectrum in Spain, the LoRa communication technology, and the TinyGS platform, as well as the complete process of design, construction, and validation of the proposed station.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
1 Introducción	1
2 Contexto teórico sobre comunicaciones por satélites	3
2.1. <i>Satélites</i>	3
2.1.1 Tipos de órbitas	3
2.1.2 Componentes de los satélites	5
2.2 <i>Estación Terrena</i>	12
2.3 <i>CNAF</i>	16
2.4 <i>New Space</i>	18
2.4.1 Áreas de oportunidades del New Space	18
3 Tecnología LoRa en Comunicaciones satelitales	19
3.1 <i>Tecnología LoRa</i>	19
3.1.1 Protocolo LoRaWAN	20
3.1.2 Características de la interfaz radio	22
3.2 <i>Proyecto TinyGs</i>	23
4 Diseño e implementación de la estación terrena	27
4.1 <i>Diseño y construcción de la antena</i>	28
4.1.1 Elección de la antena	28
4.1.2 Diseño de la antena QFH	30
4.1.3 Cálculos para la frecuencia de 433 MHz	32
4.1.4 Construcción	36
4.2 <i>Elección y configuración de la estación base</i>	44
4.2.1 Especificaciones técnicas de la placa	45
4.2.2 Configuración del firmware	46
4.3 <i>Resultados</i>	53
4.4 <i>Precios de construcción de la estación terrena</i>	61
5 Conclusiones y líneas futuras	63
Referencias	65
Anexo A. Diseño y simulación de antenas en 4nec2	69

5.1	<i>Estructura del NEC2 y simulación</i>	81
Anexo B.	Detalles del NanoVNA	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales y costos

61

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Fuerzas que actúan en un satélite en una órbita estable	4
Ilustración 2. Tipos de órbitas	5
Ilustración 3: Subsistemas de un satélite	6
Ilustración 4. Satélite con estabilización por spin	6
Ilustración 5. Satélite con estabilización de tres ejes	7
Ilustración 6. Fracción del período orbital en sombra en función de la altitud del satélite	7
Ilustración 7. Paso de mensajes de la acción de telecomando [6]	8
Ilustración 8. Flujo del subsistema de seguimiento, telemetría y telecomando	8
Ilustración 9. Bandas de frecuencias satelitales	9
Ilustración 10. Esquema del transpondedor transparente de conversión simple	9
Ilustración 11. Esquema del transpondedor transparente de conversión doble.	10
Ilustración 12: Transpondedor transparente digital	10
Ilustración 13. Transpondedor regenerativo	10
Ilustración 14. Subcanales del plan de frecuencias en la banda 6/4 GHz	11
Ilustración 15. Tipos de antenas existentes en un satélite	11
Ilustración 16. Zonas de cobertura según la antena	12
Ilustración 17. Componentes de una estación terrena genérica	13
Ilustración 18. Conversión simple de frecuencia. Selección de la FI	13
Ilustración 19. Potencia de salida según el tipo de amplificador	14
Ilustración 20. Estructura interna del amplificador Klystron	15
Ilustración 21. Estructura interna del amplificador TWT	15
Ilustración 22. Estructura del amplificador SSP [11]	16
Ilustración 23. Ejemplo del CNAF. UN-115 [16]	17
Ilustración 24.UN-30 Aplicaciones de baja potencia en banda ICM de 433 MHz.	18
Ilustración 25. Relación entre LoRa y LoRaWAN con el modelo OSI	19
Ilustración 26. Elementos de la arquitectura LoRaWAN. [21]	20
Ilustración 27. Clasificación de los nodos.	21
Ilustración 28. Seguridad de las comunicaciones en LoRaWAN	22
Ilustración 29. Fundadores de TinyGs	23

Ilustración 30. Arquitectura de TinyGs [23]	24
Ilustración 31. Página principal TinyGs	25
Ilustración 32. Historial de los últimos paquetes recibidos	25
Ilustración 33. Satélites registrados en la plataforma	25
Ilustración 34. Esquema general del proyecto	27
Ilustración 35. Antena eggbeater	28
Ilustración 36. Antena QFH	29
Ilustración 37. Comparación de los patrones de radiación de las antenas QFH y eggbeater	29
Ilustración 38. Con los autores Maxwell y Walter Ozman, W2WGH, observando en el centro, el ingeniero de RCA Randy Bricker (a la derecha) entrega al ingeniero de la NASA Jan King, W3GEY, la antena baliza cuadrifilar hélice de 2304 MHz diseñada por W2DU que voló en el OSCAR 7.	30
Ilustración 39. Elemento radiante de bucle cuadrado con polarización horizontal	31
Ilustración 40. Bucle helicoidal bifilar de media vuelta	31
Ilustración 41. Parámetros a introducir en la calculadora	33
Ilustración 42. Simulación para un número de vueltas de 0.25	33
Ilustración 43: Simulación para un número de vueltas de 0.5	34
Ilustración 44. Simulación para un número de vueltas de 0.75	34
Ilustración 45. Resultados de Jcoppens para el cuadro grande	35
Ilustración 46. Resultados de Jcoppens para el cuadro pequeño	35
Ilustración 47. Materiales necesarios	37
Ilustración 48. Vista tapa exterior pegada y cerrada.	37
Ilustración 49. Tapa exterior abierta	38
Ilustración 50. Plantilla de taladrado del tubo central de PVC	38
Ilustración 51. Plantilla de corte para los tubos del cuadro grande	39
Ilustración 52. Plantilla de corte para las varillas del cuadro grande.	39
Ilustración 53. Plantilla de corte para los tubos del cuadro chico.	40
Ilustración 54. Plantilla de corte para las varillas del cuadro chico	40
Ilustración 55. Tubos ya cortados y perforados	40
Ilustración 56. Colocación de los tubos correcta. Vista exterior.	41
Ilustración 57. Orientación y conexionado	42
Ilustración 58. Colocación de las varillas formando media vuelta	42
Ilustración 59. Resultado del conexionado final tras soldar.	43
Ilustración 60. Crimpado del cable coaxial con el conector SMA.	43
Ilustración 61. Resultados de la NanoVNA. Carta de Smith y ROE.	44
Ilustración 62. Placa de la estación base. Modelo LILYGO T-Beam v1.2	45
Ilustración 63. Consumo de corriente RF en modo activo del ESP32 [38]	45
Ilustración 64. Requerimientos de corriente del GPS NEO-6M [40]	46
Ilustración 65. Características eléctricas del AXP2101	46
Ilustración 66. Página principal del instalador del TinyGs	47

Ilustración 67. Instalación paso 1	47
Ilustración 68. Instalación paso 2	47
Ilustración 69. Instalación paso 3	48
Ilustración 70. Configuración de la red	48
Ilustración 71. Dashboard tras el registro	49
Ilustración 72. Pantalla principal	49
Ilustración 73. Red local configurada	50
Ilustración 74. Inicio del bot de Telegram	50
Ilustración 75. Menú bot de Telegram	51
Ilustración 76. Nueva estación desde la consola del usuario.	51
Ilustración 77. Configuración nueva estación vía automática.	52
Ilustración 78. Configuración nueva estación vía manual.	52
Ilustración 79. Elección del tipo de placa	53
Ilustración 80. Confirmación de la estación vía bot Telegram	53
Ilustración 81. Página principal de la estación del usuario	54
Ilustración 82. Dashboard cuando se recibe un satélite	54
Ilustración 83. Surveillance-435	55
Ilustración 84. Mapa 3D de seguimiento satelital	55
Ilustración 85. Información proveniente del mapa 3D	56
Ilustración 86. Grid con el historial de los satélites recibidos.	56
Ilustración 87. Gráfico de la telemetría recibida	57
Ilustración 88. Historial de todos los paquetes recibidos.	57
Ilustración 89. Paquete recibido con SNR positiva	58
Ilustración 90. Vista informativa de un paquete recibido, concretamente de Norby-2	58
Ilustración 91. Otras estaciones que recibieron el mismo paquete visto en la captura 67. Parte 1.	59
Ilustración 92. Otras estaciones que recibieron el mismo paquete visto en la captura 67. Parte 2.	59
Ilustración 93. Paquete recibido del satélite Polytech_Universe-4	59
Ilustración 94. Colocación de la antena	60
Ilustración 95. Distribución final de la estación base.	60
Ilustración 96. Menú Main de 4nec2	69
Ilustración 97. Opción File del Main de 4nec2	70
Ilustración 98. Opción Edit del Main de 4nec2	70
Ilustración 99. Opción Settings del Main de 4nec2	71
Ilustración 100. Opción Calculate del Main de 4nec2	71
Ilustración 101. Opción Window del Main de 4nec2	72
Ilustración 102. Opción Show del Main de 4nec2 con sus 2 posibilidades aplicadas	72
Ilustración 103. Opción Run del Main de 4nec2	72
Ilustración 104. Opción Help del Main de 4nec2	73
Ilustración 105. Iconos de la barra de herramientas	73

Ilustración 106. Vista de la ventana Geometry.	74
Ilustración 107. Opción Show del Geometry de 4nec2	75
Ilustración 108. Opción View del Geometry de 4nec2	75
Ilustración 109. Opción Validate del Geometry de 4nec2	76
Ilustración 110. Opción Currents del Geometry de 4nec2	76
Ilustración 111. Opción B de Currents	77
Ilustración 112. Opción Segm del Geometry de 4nec2	77
Ilustración 113. Opción Plot del Geometry de 4nec2	78
Ilustración 114. Ventana Pattern	78
Ilustración 115. Opción Show de la ventana Pattern de 4nec2	79
Ilustración 116. Opción Far field de la ventana Pattern de 4nec2	79
Ilustración 117. Opción Compare de la ventana Pattern de 4nec2	80
Ilustración 118. Opción Transfer de la ventana Pattern de 4nec2	80
Ilustración 119. Opción Fftab de la ventana Pattern de 4nec2	80
Ilustración 120. Opción Plot de la ventana Pattern de 4nec2	80
Ilustración 121. Paso 1 de la simulación en 4nec2	82
Ilustración 122. Paso 2 de la simulación en 4nec2	82
Ilustración 123. Opción Symbols del editor	83
Ilustración 124. Opción Geometry del editor	83
Ilustración 125. Paso 3. Opción Environment de Freq/Ground del editor	84
Ilustración 126. Paso 4. Estado del suelo	84
Ilustración 127. Paso 5. Calcular	85
Ilustración 128. Simulación Far field pattern	85
Ilustración 129. Resultados de la Simulación 1	86
Ilustración 130. Icono Diagrama 3D	86
Ilustración 131. Pestaña 3D Viewer	87
Ilustración 132. Resultado tras aplicar los filtros comentados	87
Ilustración 133. Simulación Frequency sweep	88
Ilustración 134. Resultados simulación 2. Opción SWR/ref	89
Ilustración 135. Resultados simulación 2. Opción Gain/FB	90
Ilustración 136. Resultados simulación 2. Opción Impedance	90
Ilustración 137. Mapa estructural del Menú de la NanoVNA	91
Ilustración 138. Home Menú de la NanoVNA	92
Ilustración 139. Como introducir un rango de frecuencias en la NanoVNA	92
Ilustración 140. Kit de calibración	93
Ilustración 141. Desde el Home Menú selección de la opción CAL	93
Ilustración 142. Opción calibrar de la NanoVNA	94
Ilustración 143. Etapa ISOLN de la calibración	94

Ilustración 144. Etapa THRU de la calibración.	95
Ilustración 145. Coordenadas cartesianas en el diagrama de Smith.	95
Ilustración 146. Comprobación circuito abierto	96
Ilustración 147. Comprobación circuito cerrado.	96
Ilustración 148. Comprobación carga adaptada de 50 Ω .	97

1 INTRODUCCIÓN

Desde los primeros intentos del ser humano por comunicarse a distancia, las telecomunicaciones han evolucionado de manera continua impulsadas por la necesidad de transmitir información de forma rápida, fiable y global. A lo largo del siglo XX, el desarrollo de la radio, la televisión y posteriormente las comunicaciones móviles marcó hitos decisivos en esta transformación, aunque uno de los avances más significativos en este proceso fue la aparición de las comunicaciones por satélite que permitieron por primera vez establecer enlaces globales sin depender de infraestructuras terrenas.

Los primeros satélites de comunicaciones como Telstar (1962) o Intelsat I (1965) inauguraron una nueva era en la que la transmisión de señales a través del espacio se convirtió en una realidad tecnológica. Desde entonces, la industria espacial ha evolucionado desde grandes satélites geoestacionarios de alto coste hacia constelaciones de satélites en órbita baja (LEO), mucho más pequeños, económicos y accesibles, dando lugar a un nuevo paradigma conocido como New Space.

En este contexto, las comunicaciones satelitales de baja potencia y bajo coste han cobrado un interés creciente y tecnologías como LoRa, inicialmente concebidas para redes terrenas del Internet de las Cosas (IoT), han demostrado su potencial para establecer enlaces satelitales bidireccionales con requisitos energéticos mínimos permitiendo el desarrollo de proyectos colaborativos y abiertos como TinyGS fomentando la participación ciudadana y académica en la observación y estudio del espacio.

La evolución de las estaciones base satelitales ha seguido un recorrido paralelo. Si bien en las primeras décadas eran sistemas complejos, costosos y exclusivos de agencias espaciales, en la actualidad es posible construir estaciones funcionales con componentes comerciales y antenas diseñadas por el propio usuario y todo ello gracias al progreso en electrónica de bajo consumo, microcontroladores programables y la disponibilidad de software libre de simulación y procesamiento de señales.

Este Trabajo de Fin de Grado se enmarca en el movimiento promovido por el New Space con el objetivo de diseñar, construir, simular y validar una estación base autosuficiente y de bajo coste para la recepción de telemetría satelital, integrando la solución de TinyGS y empleando la tecnología LoRa como medio de comunicación.

A lo largo del trabajo se abordan conceptos como los fundamentos teóricos de las comunicaciones, el proceso de diseño y construcción de una antena QFH optimizada para la banda ISM de 433 MHz y la validación experimental del sistema completo. De forma más precisa, el documento comienza en el Capítulo 2 con una introducción teórica sobre generalidades de los satélites y los subsistemas de una estación base, entre otros, con el fin de asentar conceptos necesarios para el posterior diseño y construcción en la estación. Por otro lado, en el

Capítulo 3, se repasará la modulación usada y se detallará la plataforma en la que se registrará la estación y en el Capítulo 4 se presentará paso a paso el diseño, simulación y construcción tanto de la antena como del receptor.

2 CONTEXTO TEÓRICO SOBRE COMUNICACIONES POR SATÉLITES

En este apartado hablaremos de forma teórica de los elementos que conforman una comunicación por satélite. Para la misma existen dos componentes principales, que profundizaremos en los siguientes apartados o secciones como son los satélites y la estación terrena. También se entrará en detalle sobre la regulación de las bandas de frecuencias en las que se puede transmitir y recibir en este tipo de escenarios.

2.1. Satélites

Los satélites son dispositivos creados por el ser humano que se lanzan a una órbita concreta de la Tierra u otros cuerpos celestes y que tienen una serie de funciones cruciales en la actualidad. Para entender un poco el funcionamiento de un satélite hay que entender primero las órbitas que pueden llegar a seguir, que se explicarán en el primer apartado así como los distintos componentes en los siguientes apartados.

2.1.1 Tipos de órbitas

Una órbita [1] es la trayectoria curva que sigue un cuerpo bajo la influencia gravitatoria de otro cuerpo con mayor masa, si fuesen de igual masa orbitarían entre sí sin que ninguno estuviese en el centro.

A nivel físico, el movimiento orbital puede entenderse a través de las leyes de Newton, siendo la segunda de ellas la que más relevancia tiene:

$$F = m \cdot a \quad (1)$$

donde F es la Fuerza medida en Newtons (N), m es la masa en Kilogramos (Kg) y a es la aceleración medida en metros/segundos.

Cuando el satélite está en órbita, se ve sometido a dos fuerzas contrarias; una centrípeta causada por la gravedad de la Tierra que lo atrae y otra centrífuga producida por la velocidad orbital que lo aleja, haciendo que esté estable en la órbita de forma equilibrada.

Esta velocidad en una órbita circular viene dada por la siguiente ecuación:

$$v = \left(\frac{\mu}{r}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)} \quad (2)$$

donde v es la velocidad del satélite, r es el radio de la órbita desde el satélite hasta el centro del planeta y μ es

la constante de Kepler cuyo valor es de $\mu = 3.986004418 \cdot 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$ que se define como:

$$\mu = G \cdot M_E \quad (3)$$

siendo G la constante gravitacional igual a $G = 6.672 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{Kg}^2$ y M_E la masa de la Tierra que toma un valor de $M_E = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ Kg}$

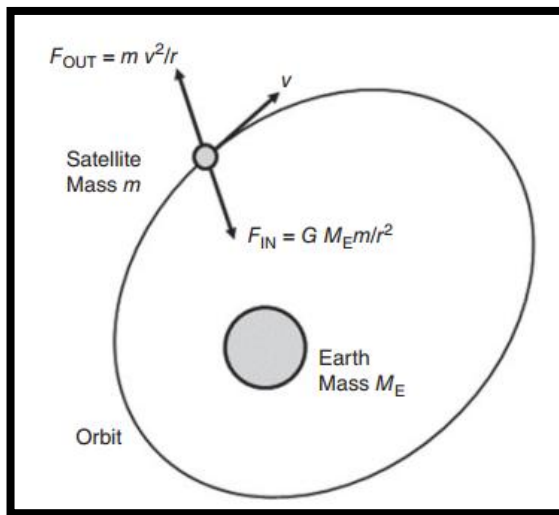


Ilustración 1. Fuerzas que actúan en un satélite en una órbita estable

Con la que podemos declarar que cuánto más cercano a la Tierra esté orbitando el satélite, más rápida será su velocidad y de esta forma podemos clasificar las órbitas según su altitud con respecto a la superficie terrena:

- **Órbita terrena baja (LEO):** se encuentra [2] [3] por debajo de los 2000 km de altitud debido a los cinturones de Van Allen que imposibilitan la vida útil de los satélites y teniendo el límite inferior a unos 180 km con el fin de evitar la resistencia del aire. Estas órbitas poseen ciertas ventajas debido a su cercanía a la Tierra. Son ideales por ejemplo para la obtención de imágenes satelitales ya que poseen menor retardo de la señal y menos pérdidas, pero tienen el inconveniente de que poseen un número muy elevado de satélites hoy en día. Además, estos satélites están sometidos a grandes velocidades y, en consecuencia, se complica la posibilidad de comunicarse con ellos ya que están muy poco tiempo en línea de vista con las estaciones base.
- **Órbita terrena media (MEO):** se define entre los 10000 km y los 20000 km de altitud, entre las órbitas LEO y GEO, cerca del 2º cinturón de Van Allen, donde hay muchas partículas cargadas. Los satélites que están entre esas alturas se usan con frecuencia en los sistemas de posicionamiento global como el sistema europeo Galileo
- **Órbita geoestacionaria (GEO):** está situada a unos 35786 km de altitud. Los satélites pertenecientes a esta órbita siguen la rotación terrena dando lugar a un fenómeno óptico que hace que parezcan estacionarios con respecto a un punto fijo, ofreciendo múltiples ventajas como permitir que las antenas situadas en la Tierra tengan una posición fija hacia el satélite.
- **Órbita altamente excéntrica (HEO):** situadas hasta los 50000 km de altura. A diferencia de las anteriores esta órbita posee un movimiento elíptico, dando lugar a una excentricidad que hace que la velocidad varíe, siendo mínima en el punto más lejano, apogeo y máxima en el punto más cercano, perigeo. Esa excentricidad está comprendida entre 0 y 1, denotando a las órbitas circulares con una excentricidad nula mientras que a una elíptica un número menor que la unidad ya que, si fuese igual a 1 tendría un movimiento parabólico y al alcanzar la energía necesaria escapa de la atracción del objeto central. Por ello, una de las ventajas de los satélites que orbitan en la misma, es que cuando alcanzan el apogeo, su velocidad se reducen y ofrecen cobertura en esa zona concreta durante mucho tiempo.

- **Órbita Polar (PO):** se encuentran entre los 200 y 1000 km de altitud, orbitando de un polo a otro, aunque no necesariamente debe pasar por ellos, con una desviación de unos 90° ya entra dentro de esta clasificación. Esto proporciona una gran cobertura de la Tierra mientras ésta misma va rotando.
- **Órbita sincrónica solar (SSO):** este tipo de órbita tiene la misma rotación que la Tierra alrededor del Sol teniendo por ende a los satélites en la misma posición sobre éste y siempre en un mismo punto. Esto hace que el monitoreo y la observación en un largo periodo hacia nuestro planeta sea muy nítida y de gran ayuda a los científicos tanto para la recolección de datos como para afrontar todo tipos de adversidades sobre todo climáticas tras el auge del cambio climático.
- **Órbitas de transferencia Geostacionaria (GTO):** se usan para pasar de una órbita a otra con el fin de no usar ningún vehículo de lanzamiento que lo lleve hasta el lugar objetivo sino haciendo uso sólo de los motores de la nave.
- **Puntos de Lagrange:** son puntos específicos donde los campos gravitacionales de dos masas, como la Tierra y el Sol, se fusionan de forma que crean regiones estables que permiten a las naves orbitar en esas zonas y ancladas a la Tierra. Esto es útil cuando en una misión con altas necesidades de estabilidad no es posible acercarse mucho a la Tierra debido a la radiación, luz o sombra que pueden interferir en ella, como es el caso de Gaia y Euclid.
- **Órbita heliocéntrica:** es aquella que gravita alrededor del Sol. Para poder acceder a esta órbita es necesario salir de la gravedad de nuestro planeta alcanzando la velocidad de escape y quedar atrapada así por la del Sol. Las misiones con carácter de estudio hacia otros planetas, estrellas o incluso el espacio profundo usan esta órbita ya que permite viajar a distancias enormes sin la dependencia de gravedad Terrena.

En la Ilustración 2 se puede apreciar un esquema visual con todas ellas:

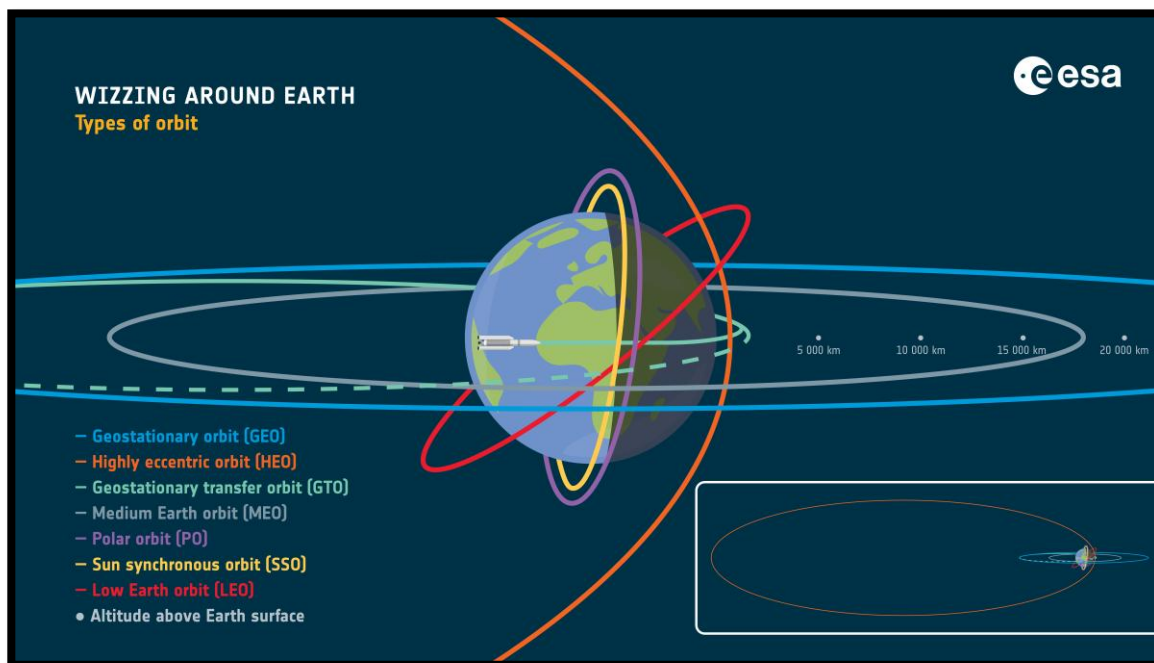


Ilustración 2. Tipos de órbitas

2.1.2 Componentes de los satélites

Un satélite está compuesto por los distintos subsistemas que podemos apreciar en la Ilustración 3 [2] y que describiremos a continuación:

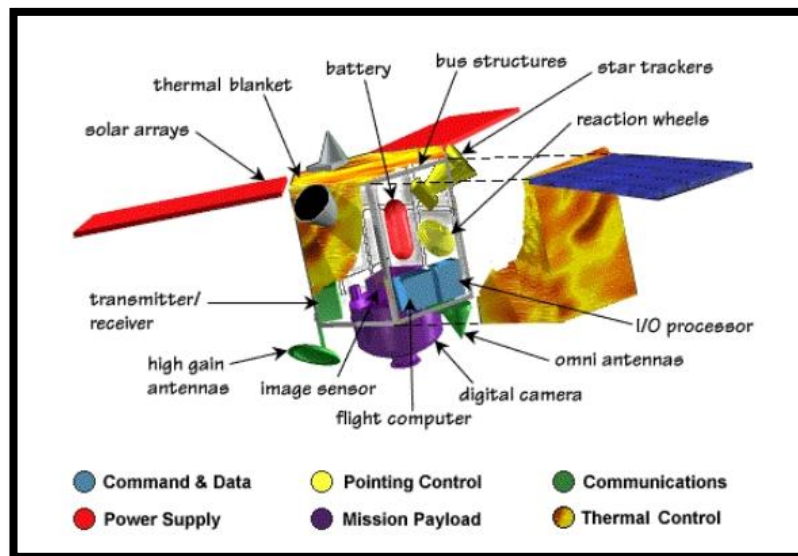


Ilustración 3: Subsistemas de un satélite

2.1.2.1 Subsistema de estabilización y control de posicionamiento.

Los satélites tienden a variar su posición debido a las fuerzas gravitatorias que sufren, por eso este subsistema tiene como finalidad conservar la orientación de las antenas mediante dos formas distintas de estabilización que además son apoyadas a través de sensores inerciales y de referencia externa, así como de actuadores. Dichas formas son [3]:

- **Spin:** el tambor exterior giratorio del satélite va rotando sobre su eje para estabilizarlo. Este tipo de satélites suelen ser geoestacionarios y como podemos observar en la Ilustración 4, están rodeados de paneles solares con el fin de poder obtener la mayor energía solar posible debido a su posición con respecto al ecuador.

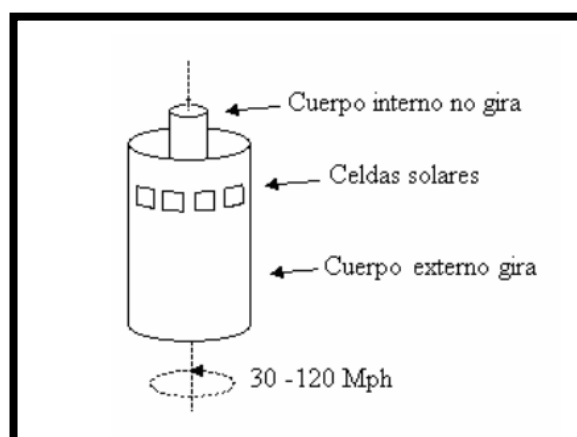


Ilustración 4. Satélite con estabilización por spin

- **Tres ejes:** los ejes de rotación se encuentran posicionados en el interior del satélite, concretamente en el centro, lo que hace que el satélite no rote y que los paneles solares estén apuntando continuamente al sol y obtengan más energía que los del tipo anterior.

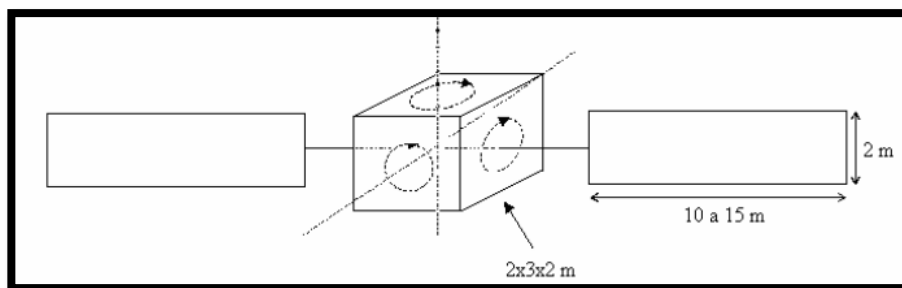


Ilustración 5. Satélite con estabilización de tres ejes

2.1.2.2 Subsistema de generación de potencia

Por otro lado, el subsistema de generación de potencia tiene como objetivo proporcionar la energía necesaria para hacer funcionar a los distintos componentes del satélite. Aunque alguna vez se han usado generadores termonucleares, a día de hoy los más usados son paneles solares de Si (Silicio) o GaAs (Arseniuro de Galio). Para los mismos hay que tener en cuenta que la eficiencia es del 20 al 25 % y que decae con el paso del tiempo debido en parte al impacto de protones y electrones, por lo que los paneles se han de sobredimensionar, para dar servicio en toda la vida útil del satélite.

Por otro lado, el sistema de generación de potencia debe tener en cuenta la ocurrencia de eclipses de la Tierra ya que afectan a la descarga de las baterías. Mientras que en LEO ocurren aproximadamente uno por órbita todos los días del año, en GEO son más escasos y dependen de la estación (sólo existen eclipses alrededor de los equinoccios de primavera y otoño con duraciones máximas de 70 min). En la Ilustración 6 se puede observar el porcentaje de eclipses en LEO en función de la altura satelital.

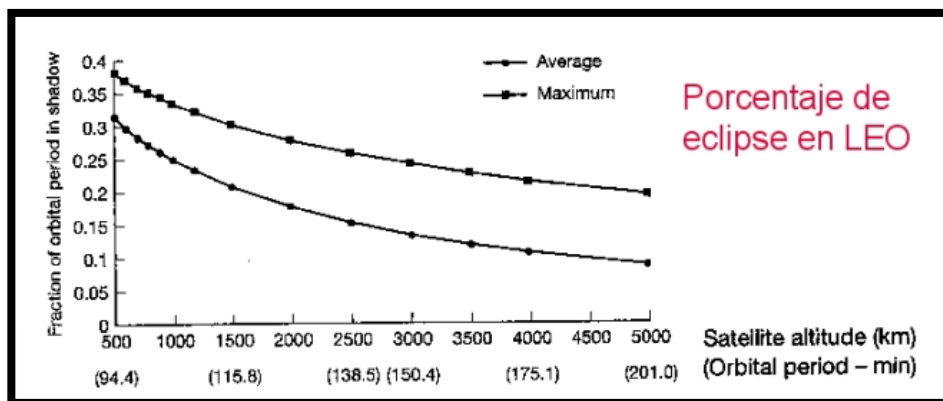


Ilustración 6. Fracción del período orbital en sombra en función de la altitud del satélite

2.1.2.3 Subsistema de telemetría, seguimiento y telemando

Este subsistema está compuesto por un microprocesador que monitoriza distintos puntos del satélite (tensiones, corriente, temperaturas, contadores) y genera paquetes periódicos de telemetría para que los operadores de control sepan el estado de los componentes. Además, este subsistema cuenta con radiobalizas para obtener la posición del satélite desde la estación base terrena y poder hacer así un seguimiento constante del satélite. Por último, es posible enviar órdenes al satélite gracias al telemando, cuyo paso de mensajes a seguir son los que se muestran en la Ilustración 7 por cada acción.

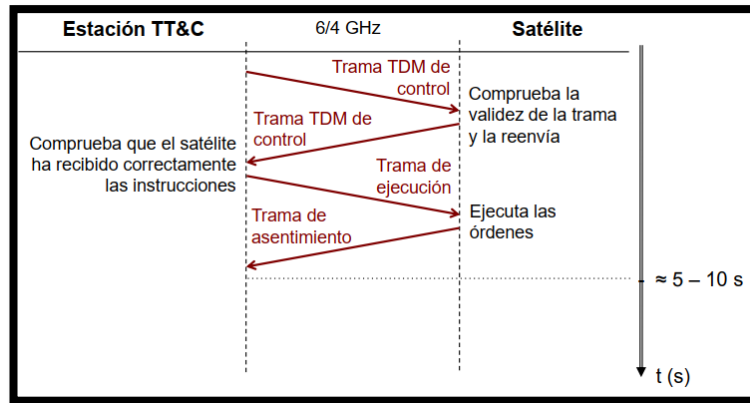


Ilustración 7. Paso de mensajes de la acción de telecomando [4]

Podemos ver en la Ilustración 8, el flujo de las distintas funcionalidades del subsistema en su totalidad reflejado en la estación terrena.

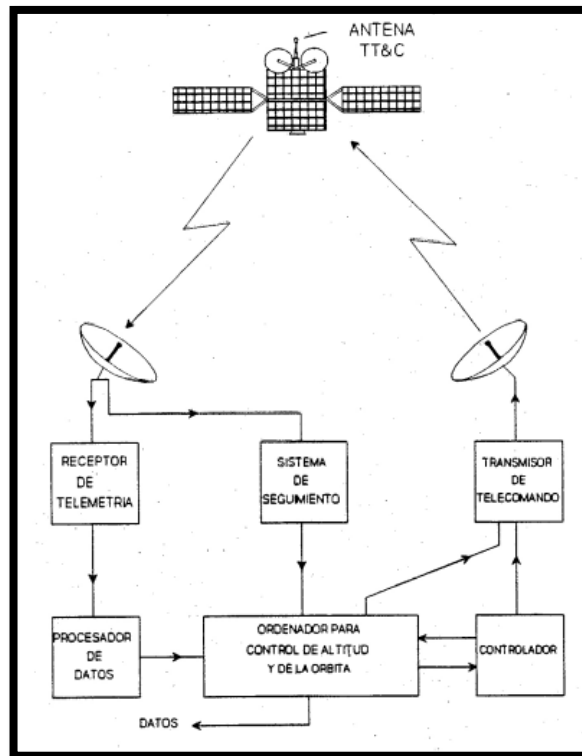


Ilustración 8. Flujo del subsistema de seguimiento, telemetría y telecomando

2.1.2.4 Subsistema de control térmico

Este subsistema [5] se asegura de que el satélite trabaja en un rango de temperaturas razonables durante su vida útil, esencial para la integridad física del satélite. Ese rango puede llegar desde -270°C hasta 2000°C ya que, al no existir atmósfera, las zonas cercanas al sol presentan temperaturas muy elevadas y las que están en el espacio profundo muy bajas.

2.1.2.5 Subsistema de Comunicaciones

Antes de definirlo es importante aclarar las bandas de frecuencia que usan los satélites. Son definidas por el

organismo encargado de la reglamentación de los sistemas de Comunicaciones vía satélite, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).

Satellite band	Frequency range	Direction: UL/DL	Satellite services
L band	1525–1559 MHz 1626.5–1660.5 MHz	DL UL	MSS and 5G NTN systems
S band	1980–2010 MHz 2170–2200 MHz 2500–2520 MHz 2520–2670 MHz 2670–2690 MHz	DL UL DL DL UL	BSS and 5G NTN systems FSS, MSS BSS FSS, MSS
C band	3.7–4.2 GHz 5.925–6.425 GHz	DL UL	FSS systems, good rain resilience
X band	7.25–7.75 GHz 7.9–8.4 GHz	DL UL	FSS, MSS maritime FSS, MSS
Ku band	10.7–12.75 GHz 14–14.5 GHz	DL UL	FSS, MSS and BSS systems. OneWeb and Starlink.
Ka band	17.3–17.7 GHz 17.7–19.7 GHz 27.5–29.5 GHz	DL DL UL	BSS and FSS systems, mobile VSAT terminals possible, e.g., Starlink
Q/V band	37.5–42.5 GHz 47.2–52.4 GHz	DL UL	FSS systems for high throughput services
W band	71–76 GHz 81–86 GHz	DL UL	FSS system allocations, experimental missions

Ilustración 9. Bandas de frecuencias satelitales

Este subsistema según el uso del satélite, es decir de comunicaciones, científico o meteorológico, se puede definir de una manera u otra. Para los científicos y los meteorológicos, el propósito es recoger datos mediante distintos tipos de sensores o usando una serie de instrumentos para enviarlos a las estaciones en tierra. Sin embargo, para los satélites de comunicaciones este subsistema tiene como finalidad recibir la señal perteneciente a la estación terrena, amplificarla y retransmitirla de nuevo hacia la Tierra. Para ello, está compuesto principalmente por transpondedores y antenas.

El transpondedor es el encargado de “copiar” todo lo que le llega y transmitirlo a otra frecuencia en el enlace descendente. Hay distintos tipos, pueden ser:

- **Transparentes:** cumplen con la función descrita anteriormente y se rigen por el diagrama de bloques de la Ilustración 10, en el que podemos ver que está constituido por un filtro paso banda que selecciona el canal, un convertor que baja la frecuencia, pasando en este caso de 6 GHz a 4 GHz, acabando con un amplificador de alta potencia. Estos amplificadores de alta potencia, HPA, suelen ser de estado sólido (SSP) pero si la potencia necesaria es muy grande se emplean los de tubo de onda progresiva (TWT).

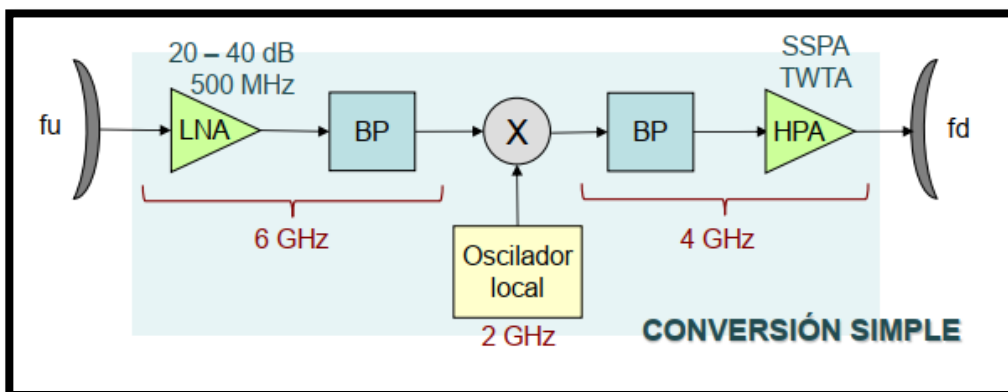


Ilustración 10. Esquema del transpondedor transparente de conversión simple

Aunque también los hay de conversión doble como se muestra en la Ilustración 11.

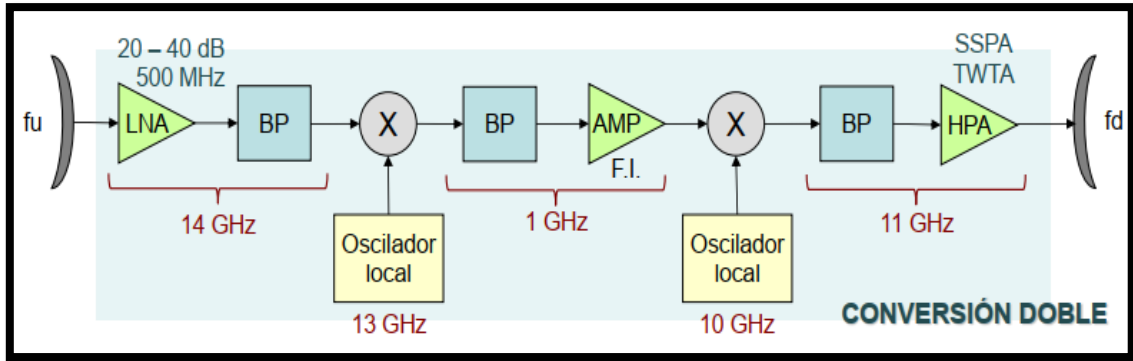


Ilustración 11. Esquema del transpondedor transparente de conversión doble.

Todas las capturas anteriores pertenecen a un transpondedor analógico. También los hay digitales cuya diferencia principal como vemos en el esquema de la Ilustración 12 es el bloque llamado DTP, cuyo objetivo es proporcionar una mayor flexibilidad a los satélites. La señal recibida se transforma a banda base con el oscilador local y sufre una conversión analógico digital (ADC). El siguiente paso en la cadena es hacer una demultiplexación de subcanales con filtrado digital donde la función de conmutación tiene como finalidad el enrutamiento de conectividad en el nivel de subcanal entre los puertos de entrada y salida. Por último, se hace una conversión digital analógica (DAC) para su posterior transformación ascendente de frecuencia y ser amplificada por el HPA antes de ser retransmitida.

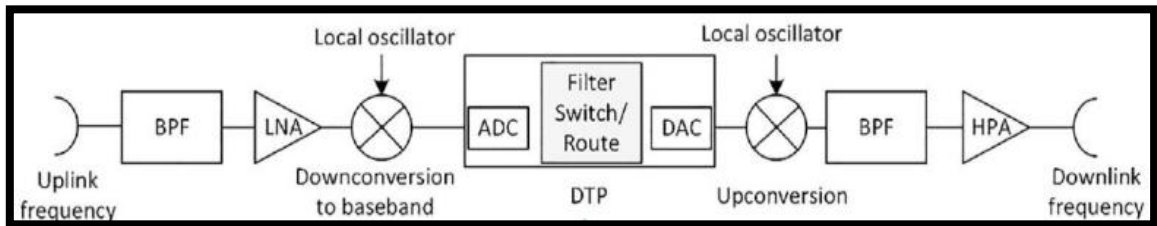


Ilustración 12: Transpondedor transparente digital

- **Regenerativos:** demodulan la señal y la procesan antes de retransmitirla, suele ser normal utilizarlos en sistemas digitales.

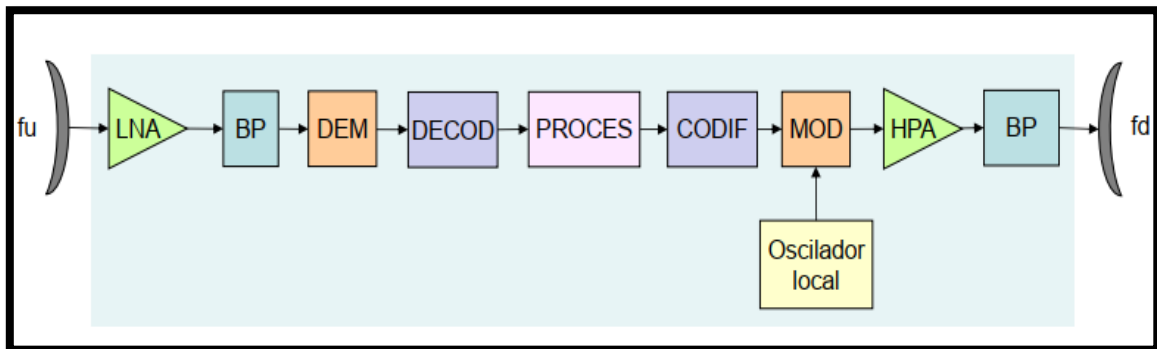


Ilustración 13. Transpondedor regenerativo

En general, aunque se haya representado el esquema de un solo transpondedor lo normal es que los satélites estén formados por muchos de ellos. Reciben una diversa cantidad de señales de muchas antenas que posteriormente dirigen a través de una matriz de conmutación hacia otras antenas. Para ello el plan de frecuencia

contempla que cada canal corresponda a un transpondedor dejando una banda de guarda entre canales, ejemplo de ello se muestra en la Ilustración 14 el plan de frecuencias en la banda de 6/4 GHz.

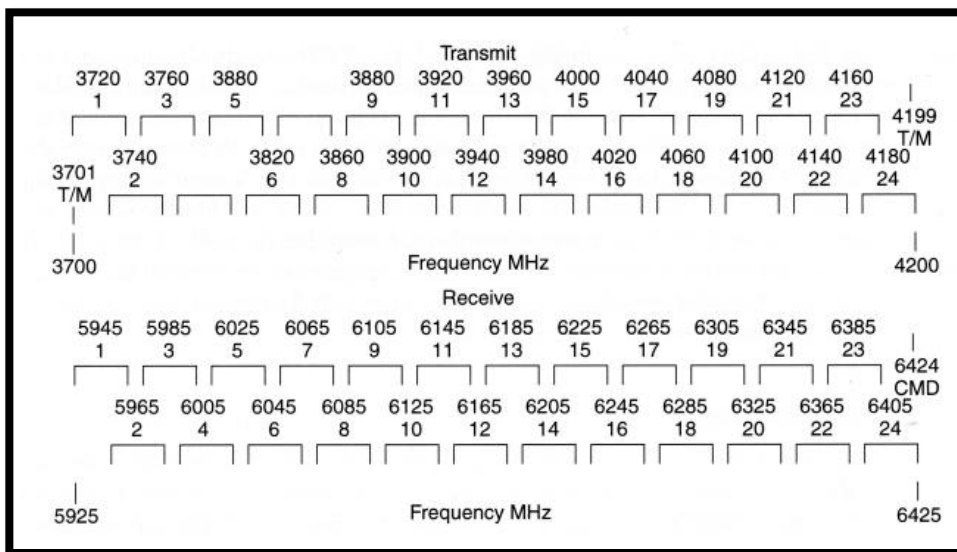


Ilustración 14. Subcanales del plan de frecuencias en la banda 6/4 GHz

Con relación a las antenas que se usan en los satélites podemos ver cuatro configuraciones de estas:

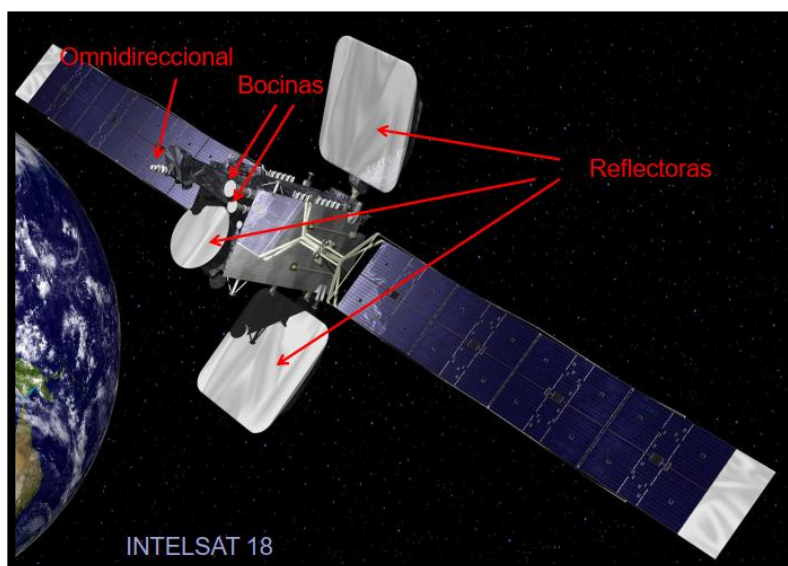


Ilustración 15. Tipos de antenas existentes en un satélite

- **Antenas filiformes:** son monopolos y dipolos, omnidireccionales, usados para la banda de UHF (300MHz a 3000 MHz) y VHF (30 hasta 300 MHz).
- **Antenas reflectoras:** proporcionan ganancias muy altas y suelen ser de carácter parabólico.
- **Antenas de bocina:** se usan para dar cobertura global y tienen ganancias bajas.
- **Antenas de matriz de fase (phased array):** consisten en múltiples elementos de antenas que se utilizan para ofrecer cobertura a una zona en concreto ya que la conformación de haces (beamforming) permite manipular la amplitud y la fase de la señal en cada elemento con el fin de que la energía se concentre

en una dirección específica.

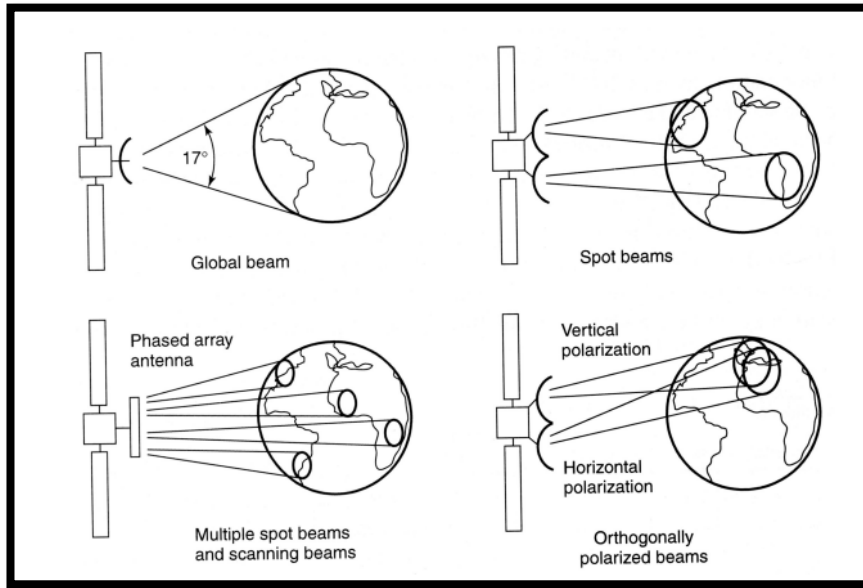


Ilustración 16. Zonas de cobertura según la antenna

Antes de finalizar este apartado, es importante analizar las relaciones correspondientes a las antenas de apertura que hemos visto anteriormente. La directividad de forma general se puede expresar de la siguiente manera:

$$D = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda^2} \cdot A_{eff} \quad (4)$$

donde λ es la longitud de onda y A_{eff} es el área efectiva que se calcula como $A_{eff} = \eta \cdot \text{Área}$, siendo η el rendimiento de la antenna.

Si es una antenna circular se puede definir cómo:

$$D = \eta \cdot \left(\frac{\pi \cdot d}{\lambda}\right)^2 \quad (5)$$

siendo d el diámetro de apertura.

El ancho de haz se puede aproximar a:

$$\theta \cong 75 \cdot \left(\frac{\lambda}{d}\right) \quad (6)$$

2.2 Estación Terrena

Las estaciones terrenas no son más que una serie de elementos interconectados incluyendo una antenna permitiendo la entrada y salida de señales en banda base o frecuencia intermedia con la finalidad de transmitir y recibir hacia el(los) satélite(s).

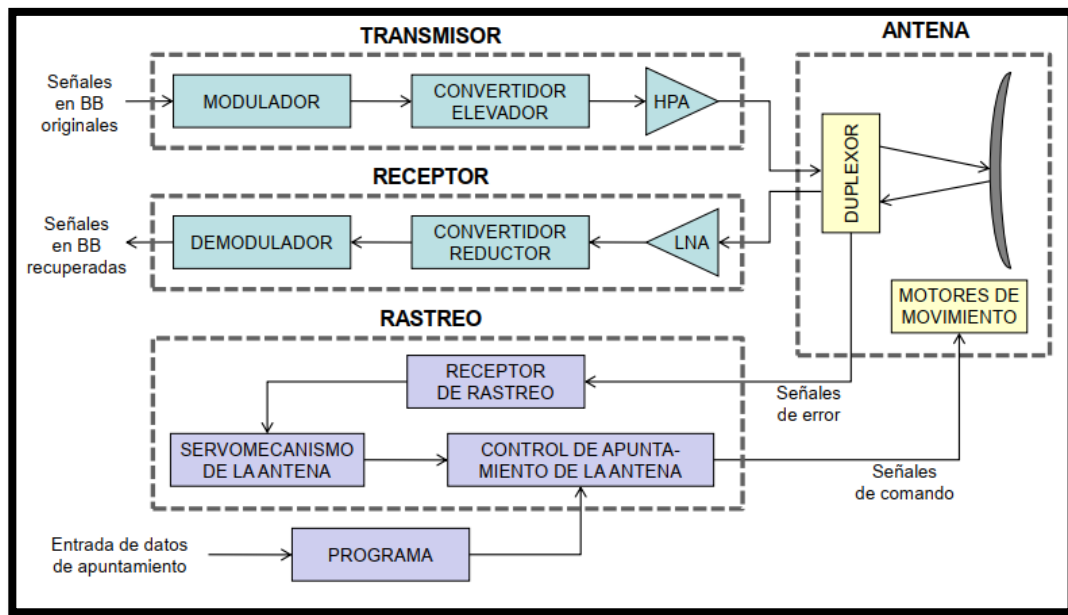


Ilustración 17. Componentes de una estación terrena genérica

En la Ilustración 17, se observa una serie de elementos en la etapa de recepción y transmisión que van a ser descritos a continuación [8]:

- **Receptor**

- Demodulador: este bloque es esencial para recuperar la información que haya sido modulada en la señal portadora del transmisor. Esta señal de información suele ser multiplexada por lo que en ese caso se requiere además un demultiplexor, aquí se ha desarrollado la explicación en base al caso de una sola señal en lugar de varias.
- Convertidor reductor: tiene como objetivo transformar la frecuencia de RF en una FI que suele ir introducida posteriormente en los demoduladores y su diagrama de bloques está descrito en las Ilustraciones 10 y 11. En la Ilustración 18 se observa claramente la selección de la FI deseada en el caso de una conversión simple.

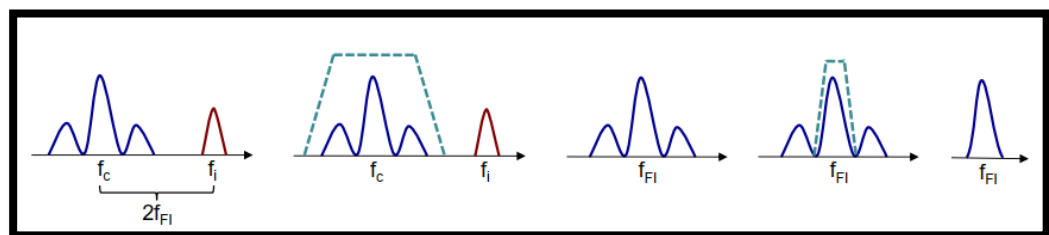


Ilustración 18. Conversión simple de frecuencia. Selección de la FI

- LNA: es un componente electrónico cuya función es amplificar la señal recibida de los satélites agregando el mínimo ruido y por tanto sin degradar la relación señal-ruido (SNR)

- **Transmisor**

- Modulador: tiene como objetivo adaptar la señal de información en una portadora de alta frecuencia para que no sufra pérdidas durante la propagación.
- Convertidor elevador: Su funcionalidad se basa en recibir la señal FI modulada y convertirla

en una señal RF.

- HPA: son amplificadores de alta potencia cuyo objetivo como su nombre indica es amplificar la señal antes de ser transmitida. Ya se han comentado con anterioridad los diversos tipos que existen en el mercado, pero se va a profundizar sobre algunas de sus características empezando por la potencia de salida que posee cada uno de ellos, siendo el Klystron el que más potencia ofrece en este aspecto como se aprecia en la Ilustración 19.

Tipo	Banda	Potencia de salida (W)
LPA (estado sólido)	C	50 – 350
	Ku	20 – 80
	Ka	10
TWTA	C	150 – 12000
	Ku	18 – 3000
	Ka	20 – 100
Klystron	C	400 – 3400
	Ku	2700 – 3000
	Ka	350 – 450

Ilustración 19. Potencia de salida según el tipo de amplificador

El **amplificador Klystron** [6] es un tubo termoiónico que tiene la capacidad de amplificar controlando la velocidad del flujo de electrones. Estos se aceleran al principio a alta velocidad a través de un potencial de varios cientos de voltios y entrando posteriormente a una zona estrecha que forma parte de una cavidad resonante donde actúan sobre ellos un campo de radiofrecuencia dando lugar a la agrupación de estos electrones. La modulación de amplitud de los electrones en ese estado estimula una fuerte señal a medida que el flujo avanza hacia un segundo resonador. Estos amplificadores se categorizan según su diseño y funcionalidad siendo el de dos cavidades el que se ha explicado y el que se muestra en la Ilustración 20.

Como se ha visto poseen una alta eficiencia y sus cavidades independientes hacen que el acoplamiento mutuo se minimice simplificando el diseño y el ajuste, pero no todo son ventajas, tiene algunas limitaciones, entre ellas cabe destacar su estrecho ancho de banda debido al uso de cavidades resonantes.

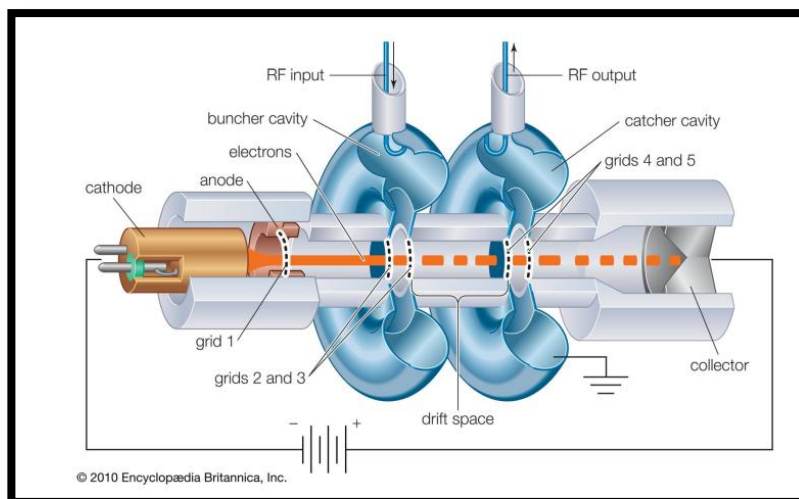


Ilustración 20. Estructura interna del amplificador Klystron

El **amplificador TWT** helicoidal es un tubo de cristal cuyo cañón contiene un cátodo que emite electrones que son transformados por los electrodos del cañón en un haz que se inyecta en la abertura de la hélice (que sustituye a las cavidades del Klystron). Para que los electrones no diverjan radialmente se usa una estructura de enfoque para mantener el haz en el diámetro requerido haciendo que los electrones divergentes vayan hacia el eje de la hélice. Esta acción amplificadora se produce mediante una interacción continua entre la componente axial de la onda del campo eléctrico que viaja por el centro de la hélice y el haz de electrones que se mueve por el eje de esta.

La ventaja que posee este tipo de amplificador con respecto al anterior es ofrece un amplio ancho de banda de operación a costa de una menor eficiencia y potencia. Además, el cátodo se va desgastando y la zona de funcionamiento lineal está limitada.

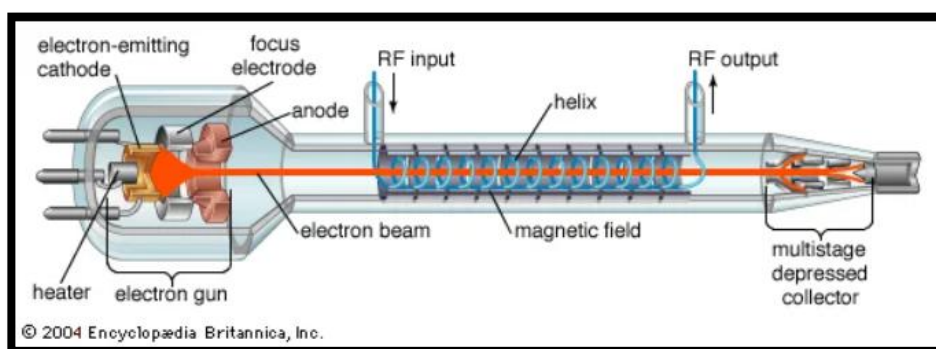


Ilustración 21. Estructura interna del amplificador TWT

El **amplificador de potencia en estado sólido** (SSP o LPA) [7] es un dispositivo electrónico que amplifica señales RF usando componentes como pueden ser transistores. Para su correcto funcionamiento la señal de entrada debe estar acotada por un rango específico, así como ser preamplificada y modificada mediante amplificadores de corriente y tensión antes de pasar por el de potencia. Una de las ventajas que tiene es que ofrece un gran ancho de banda e incluso un mejor funcionamiento en la zona lineal que el TWT, sin embargo, sus desventajas son la poca potencia de salida que posee y la sensibilidad al calor.

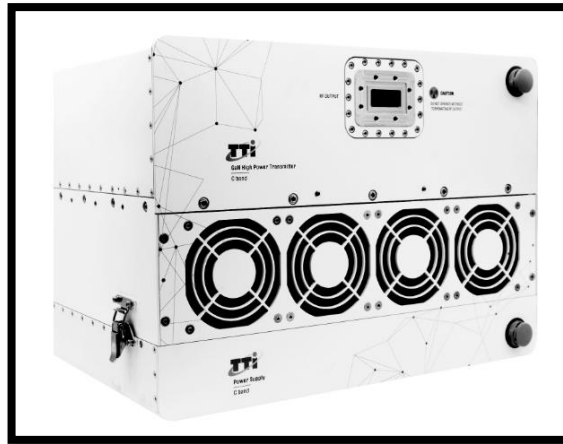


Ilustración 22. Estructura del amplificador SSP [11]

- **Antena:** suelen usarse antenas parabólicas o antenas de matriz en fase y su tamaño y la orientación de estas afecta la intensidad y calidad de la señal. Es por eso por lo que suelen usarse rotores para permitir el seguimiento automático de satélites basados en el subsistema de rastreo y así recibir una comunicación eficiente.
- **El subsistema de rastreo:** tiene como objetivo [8] el seguimiento automático de los distintos satélites, para ello se usa el sistema de posicionamiento global (GPS) o datos de parámetros orbitales con el fin de rastrear el satélite en tiempo real y poder así orientar la antena con el sistema de posicionamiento de una forma adecuada.

Normalmente [9] toda la atención está en el lanzamiento de los satélites o de las naves espaciales sin ser conscientes de las estaciones bases y lo que aportan. Como se ha visto, sin ellas no sería posible operar el satélite ni obtener datos de estos que en muchos casos son necesarios para el usuario o para aplicaciones, siendo un subsistema clave. Por otro lado, el crecimiento exponencial del número de satélites en órbita hace que el ancho de banda cada vez esté más limitado y en consecuencia se están desarrollando soluciones como redes de transmisión entre satélites y el uso de comunicaciones ópticas como alternativa a RF.

2.3 CNAF

En el reglamento de Radiocomunicaciones [10] [11] se asignan a los diferentes servicios las bandas de frecuencias y siguiéndolo, la Secretaría de Estado de Digitalización e Inteligencia Artificial elabora lo que se llama el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF). Este Cuadro es fundamental para conformar el orden del espectro en España y contiene los distintos usos para los que se reserva cada una de las bandas de frecuencias en las que se divide el espectro radioeléctrico. Este espectro está disponible para radiocomunicaciones en el rango de 8.3 KHz hasta 3000 GHz.

ATRIBUCIÓN A LOS SERVICIOS según el RR de la UIT			ATRIBUCIÓN NACIONAL	USOS	OBSERVACIONES
200 - 248 GHz			200 - 248 GHz		
Región 1	Región 2	Región 3			
232 - 235	FIJO FIJO POR SATÉLITE (espacio-Tierra) MÓVIL Radiolocalización		232 - 235 FIJO FIJO POR SATÉLITE (espacio-Tierra) MÓVIL Radiolocalización	P P P R	
235 - 238	EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (pasivo) FIJO POR SATÉLITE (espacio-Tierra) INVESTIGACIÓN ESPACIAL (pasivo) 5.563A 5.563B		235 - 238 EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (pasivo) FIJO POR SATÉLITE (espacio-Tierra) INVESTIGACIÓN ESPACIAL (pasivo)	M P M	5.563A 5.563B
238 - 240	FIJO FIJO POR SATÉLITE (espacio-Tierra) MÓVIL RADIOAVEGACIÓN RADIOLOCALIZACIÓN RADIOAVEGACIÓN POR SATÉLITE		238 - 240 FIJO FIJO POR SATÉLITE (espacio-Tierra) MÓVIL RADIOAVEGACIÓN RADIOLOCALIZACIÓN RADIOAVEGACIÓN POR SATÉLITE	P P P R R R	
240 - 241	FIJO MÓVIL RADIOLOCALIZACIÓN		240 - 241 FIJO MÓVIL RADIOLOCALIZACIÓN	P P R	
241 - 248	RADIOASTRONOMÍA RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados Aficionados por satélite 5.138 5.149		241 - 248 RADIOASTRONOMÍA RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados Aficionados por satélite	P R E E	5.138 5.149 Banda de aplicaciones ICM: 244-246 GHz UN-115

Ilustración 23. Ejemplo del CNAF. UN-115 [12]

La asignación anteriormente descrita se hace de manera fija y estática [13, 14] lo que hace que sea ineficiente el uso del espectro radioeléctrico disponible y por eso las entidades reguladoras internacionales están buscando alternativas. Una de estas soluciones es el uso de un acceso dinámico al espectro (DSA), que consiste en que se seleccione la frecuencia a la que operar según un punto geográfico y durante un tiempo determinado para así optimizar el uso del espectro.

El CNAF además incorpora y regula el uso nacional de las bandas Industriales, Médicas y Científicas (ICM) aunque sean una designación de la ITU, definiendo los rangos de frecuencias que se destinarán a esas bandas además de las condiciones técnicas como puede ser la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE). Estas bandas no requieren una licencia para su uso y los sistemas que las utilizan siguen una serie de condiciones de diseño para coexistir como son:

- Uso de protocolos para determinar qué frecuencias o qué intervalos de tiempo les corresponde, en caso de no haber se quedan a la espera hasta que lo encuentran.
- Envían un mensaje cuando la transmisión es correcta y cuando no lo es debido a errores de comprobación de redundancia cíclica (CRC) lo retransmiten
- Usan saltos de frecuencia (frequency hopping), esto es un proceso utilizado para dificultar la interceptación y reducir la colisión.

Se van a mostrar en la Ilustración 24 las características que deben cumplir los dispositivos que trabajen en las bandas de frecuencias de 433.050 MHz – 434.790 MHz, ya que la estación base que se diseña en esta memoria pertenece a este rango. Se puede apreciar que según el rango se obtiene una limitación de potencia radiada aparente (PRA) y en algunos casos de canalización.

Banda de frecuencias	Potencia	Canalización	Notas
433,050-434,790 MHz	1 mW p.r.a. – 13 dBm/10 kHz.	No se define.	Se permiten aplicaciones de voz con técnicas de mitigación avanzadas. Se excluyen otras aplicaciones de audio y vídeo.
433,050-434,790 MHz	10 mW p.r.a.	No se define.	Ciclo de trabajo ≤10%.
434,040-434,790 MHz	10 mW p.r.a.	25 kHz.	Se permiten aplicaciones de voz con técnicas de mitigación avanzadas. Se excluyen otras aplicaciones de audio y vídeo.

Ilustración 24.UN-30 Aplicaciones de baja potencia en banda ICM de 433 MHz.

2.4 New Space

El concepto de New Space hace referencia a una nueva estrategia del desarrollo espacial que diverge del establecido por la industria aeroespacial institucional, la cual es promovida principalmente por agencias gubernamentales como la NASA en Estados Unidos u organismos internacionales como la ESA en Europa.

El objetivo principal de las empresas que persiguen esta idea es crear un entorno comercial impulsado por los viajes espaciales a unos costes más asequibles sin que el gobierno tenga que estar involucrado de manera activa.

2.4.1 Áreas de oportunidades del New Space

Según la distancia a la que se va a realizar la actividad se pueden definir 3 zonas [15]:

- **Suborbital:** la nave llega a los 100 km aproximadamente de altura, pero en ningún momento tiene la velocidad suficiente para entrar en órbita. Las actividades llegan desde la industria del turismo que ya está vendiendo experiencias en esta zona hasta estudios de microgravedad, demostraciones tecnológicas, etc. Además, se tiene pensado desarrollar viajes de un punto de la tierra a otro, aunque aún enfrentan algunas adversidades.
- **Orbital:** suele tener lugar en órbitas LEO y HEO. En esta área, la industria del turismo da un paso más y ofrece viajes privados a la ISS donde se pueden pasar largos periodos de microgravedad mientras que los investigadores realizan periódicamente experimentos relacionados con la microgravedad entre otros.
- **Espacio profundo:** ocurre en zonas más allá de la órbita terrena y lunar. El turismo avanza hasta poder ir a la Luna mientras que los investigadores buscan desarrollar nuevos materiales para mejorar la calidad de vida, así como establecer al humano de forma productiva en el espacio y movilizarlo hacia una civilización en Marte o la Luna.

Relacionada con esta nueva tendencia, la democratización del espacio que implica garantizar un uso del espacio de manera equitativa entre todos los países ha mejorado considerablemente debido al auge de las actividades anteriormente mencionadas, aunque hace que uno de los mayores desafíos de la industria, regular el uso del espacio, crezca.

Por otro lado, el uso creciente de nanosatélites como son los CubeSats favorecen esta nueva tendencia gracias a su versatilidad y a la facilidad de acceso al espacio a un bajo coste que proporciona.

3 TECNOLOGÍA LoRa EN COMUNICACIONES SATELITALES

La ciencia de hoy es la tecnología del mañana

- Edward Teller -

3.1 Tecnología LoRa

Low Power Wide Area Network (LPWAN) [14] [16] es un tipo de red de comunicación inalámbrica usada en el área de Internet de las Cosas (IoT) cuyo diseño está orientado hacia los dispositivos que necesitan enviar datos reducidos a grandes distancias.

Dentro de este tipo de red, se usan una serie de tecnologías como LongRange (LoRa) o Sigfox, siendo esta primera la que se estudiará en este capítulo. LoRa es una tecnología inalámbrica de modulación definida a nivel de la capa física del modelo OSI y permite la transmisión de señales radio a grandes distancias haciendo uso únicamente de una sola pasarela para cubrir ciudades enteras. Las frecuencias usadas en estas tecnologías son las conocidas como Industriales, Científicas y Medicas (ICM) que no requieren licencia previa.

En relación con las características de la interfaz radio, usa una técnica de modulación de espectro ensanchado (Spread Spectrum Technique) que emplea una banda ancha de gran tamaño para la transmisión de datos y permitiendo comunicaciones simultáneas mediante saltos de frecuencia. Por otro lado, usa otra técnica variante de la anterior, CSS (Chirp Spread Spectrum) y que ofrece comunicación bidireccional.

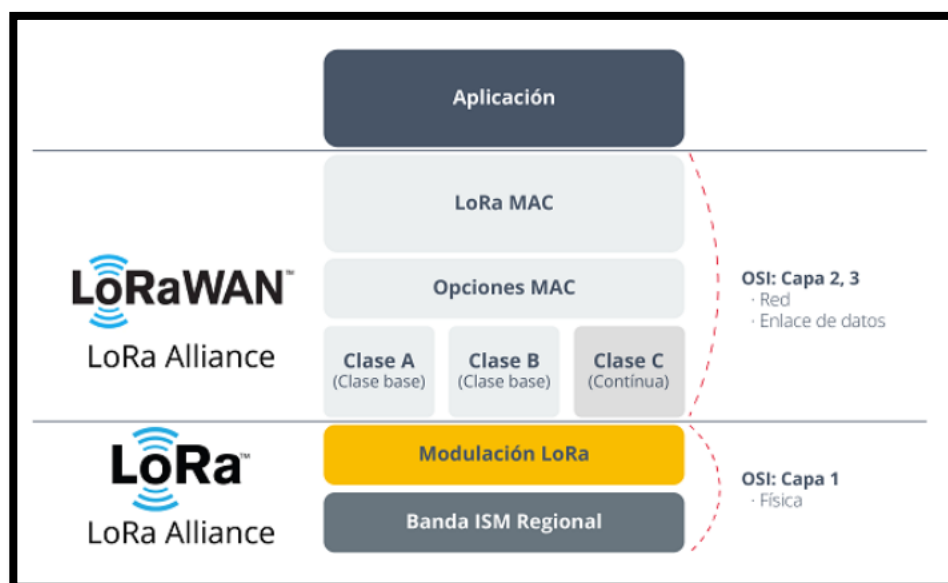


Ilustración 25. Relación entre LoRa y LoRaWAN con el modelo OSI

Con LoRa tan sólo es posible comunicar un dispositivo con otro, por lo que es necesario usar un protocolo que comunique esos dispositivos con un servidor o una nube donde se recojan esos datos.

3.1.1 Protocolo LoRaWAN

Este protocolo nace del resultado de la aplicación de la tecnología LoRa sobre las redes LPWAN que se ha visto en el apartado anterior, operando por tanto en el mismo conjunto de frecuencias ICM. La arquitectura LoRaWAN, como se muestra en la Ilustración 26, está formada por una serie de nodos que forman una topología en forma de estrella en la que se hallan conectados a distintos gateways y donde los dispositivos traducen los datos recibidos previamente al envío de estos hacia el servidor de red.

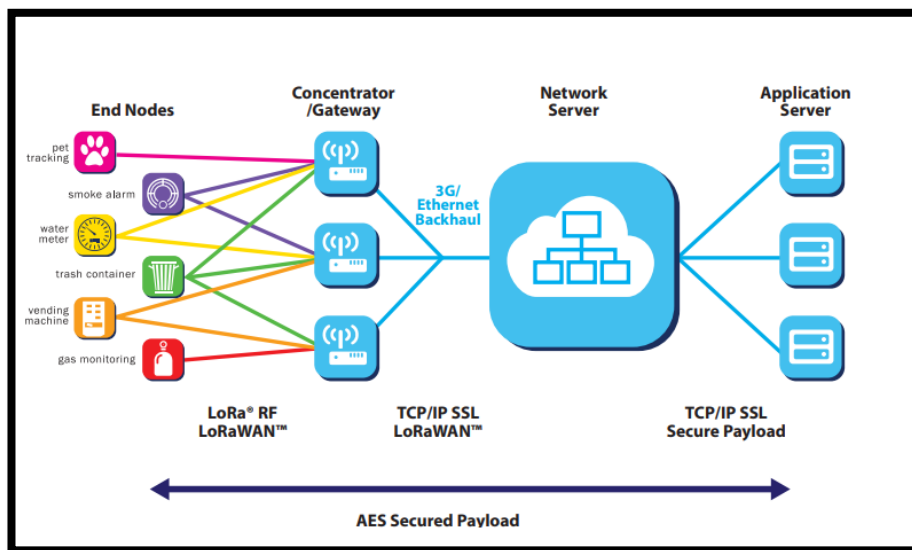


Ilustración 26. Elementos de la arquitectura LoRaWAN. [17]

Aunque se ha mencionado algunos de estos elementos anteriormente, se va a describir en profundidad cada uno de ellos:

- **Nodos:** Son los dispositivos finales, como pueden ser sensores o actuadores, que envían o reciben información utilizando la red LoRaWAN. Como podemos ver en la Ilustración 26, se comunican con los gateways a través de la modulación LoRa. Hay 3 clases de nodos según la relación entre la vida útil de sus baterías y la latencia del enlace descendente.
 - **Clase A.** Los nodos pertenecientes a esta categoría inician siempre la comunicación de forma asíncrona. Tiene como característica que tras cada transmisión en el enlace ascendente (UL) es seguida de dos ventanas de recepción en el enlace descendente (DL), permitiendo así una comunicación bidireccional y disminuyendo el consumo de energía.
 - **Clase B.** Los dispositivos de esta clase están sincronizados con la red mediante slots de recepción programados, que no son más que paquetes generados por el gateway que indican el tiempo disponible para las ventanas de transmisión. En relación con las ventanas de recepción, no es necesario enviar una transmisión previa para formarlas, aumentando así la capacidad del dispositivo para recibir información.
 - **Clase C.** Los nodos están en modo escucha la mayoría del tiempo (consumiendo más energía), y sólo cuando lo requieren cambian al modo de transmisión.

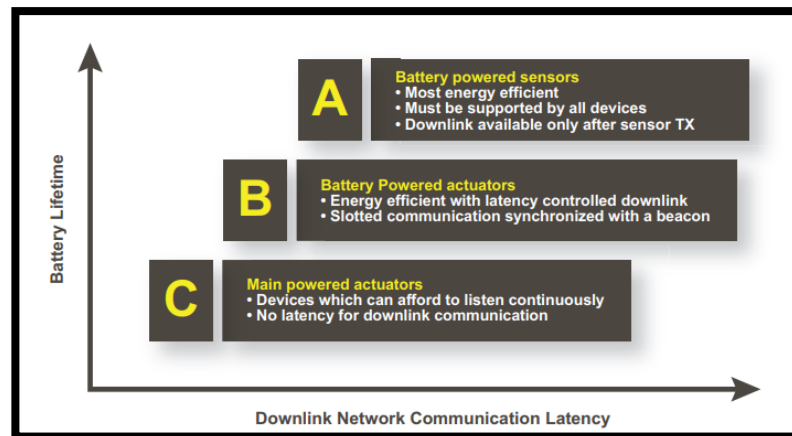


Ilustración 27. Clasificación de los nodos.

- **Gateways:** Son dispositivos que hacen de pasarela de comunicación entre los nodos y el servidor, su funcionamiento es crucial ya que con su ausencia no habría comunicación. Es importante recalcar que las transmisiones que realizan están basadas en protocolos seguros como son el SSL/TLS.
- **Servidor de red:** Son equipos encargados del procesamiento, la traducción de la información que reciben los nodos que estén conectados, así como de la configuración de éstos y de la red.
- **Servidor de aplicación:** Son los servidores cuya finalidad es el tratamiento de los datos que se transmiten por la red.

3.1.1.1 Seguridad de LoRaWAN

En el panorama actual creciente de ciberataques es impensable el no contar con medidas de seguridad en las tecnologías que se usen. En este aspecto esta tecnología hace uso de mecanismos de seguridad y cifrado en relación a las comunicaciones a través de algoritmos como por ejemplo el AES-128, utilizado para el cifrado de datos en la red. A continuación, se describen más contramedidas importantes a destacar y que se engloban en la Ilustración 28:

- Autenticación mutua a través de Over the Air Activation (OTAA). Esto es una forma segura y escalable de activar los dispositivos LoRaWAN
- Tráfico de red protegido por dos claves de sesión, AppSKey y NwkSKey.
- Uso de claves de sesión y aplicación almacenadas en dispositivos
- Uso de protocolos seguros como HTTPS y VPN

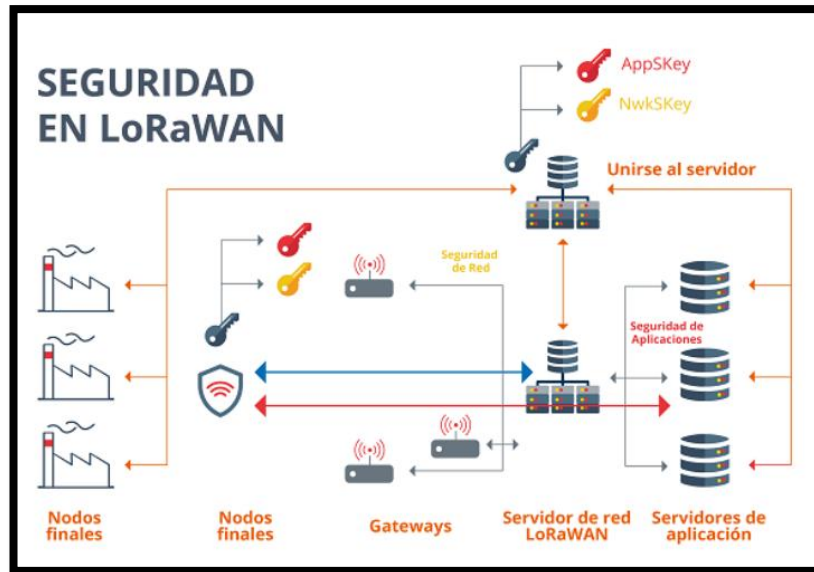


Ilustración 28. Seguridad de las comunicaciones en LoRaWAN

3.1.2 Características de la interfaz radio

Se van a definir junto con las características de LoRa ciertos conceptos relevantes para una comprensión de este apartado.

La tasa de chip y el ancho de banda se definen de manera coincidentes, pudiendo tomar valores de 125, 250 y 500 KHz.

$$B = Rc \quad (7)$$

donde B es el ancho de banda, que se puede definir como la diferencia entre la frecuencia más alta y la más baja de un tipo particular de onda y Rc es la tasa de chip, siendo los chips una secuencia aleatoria de pulsos que conforman un código y cuya duración es la siguiente.

$$Tc = \frac{1}{B} \quad (8)$$

siendo Tc la duración de los chips.

Por otro lado, la tasa de símbolos vendrá dada en función de factor de ensanchado:

$$Rs = \frac{B}{2^{SF}} \quad (9)$$

con Rs como la tasa de símbolo, donde un símbolo no es más que una representación simbólica de la señal en banda base en comunicaciones digitales y SF como factor de ensanchado. Este factor controla la tasa de chips y por tanto, la velocidad de transmisión de los datos. Un SF bajo implica unos chips más rápidos, y una tasa de transmisión de datos mayor, la modulación LoRa tiene 6 factores de ensanchado, desde $SF7$ hasta $SF12$ y es por eso que si la señal es débil o hay muchas interferencias se emplean valores altos de SF , consiguiendo una mayor duración de la señal.

Por último, la tasa binaria adaptativa (ADR) viene representada como:

$$Rb = SF \cdot \frac{B}{2^{SF}} \cdot \frac{4}{4 + CR} \quad (10)$$

con Rb como la tasa binaria adaptativa y CR la tasa de código (coding rate) con valores asociados al código de canal.

3.2 Proyecto TinyGs

Es una red mundial [18] de estaciones terrenas que tiene como fin operar satélites LoRa, sondas meteorológicas, etc, de una forma asequible y sin necesidad de poseer una gran variedad de conocimientos en Telecomunicaciones. Además, las frecuencias que se usan pertenecen a las bandas de radioaficionados por lo que el proyecto es de código abierto y público, es decir, toda la información que es recogida se publica en la plataforma. Esa información es denominada telemetría, y gracias a ella es posible saber el estado de las baterías o la potencia que reciben las células solares entre otros parámetros de interés, pero no es la única función que tienen estos satélites. Algunos de ellos poseen experimentos científicos en su interior o tienen un modo repetidor que consiste en transmitir lo que le llega de la estación terrena, pero a una frecuencia distinta.

Este proyecto originalmente tuvo el nombre de ESP32 Fossa Groundstation y surgió bajo la necesidad de recibir la telemetría del FOSSA-SAT, satélite lanzado en 2019, de una forma más versátil utilizando módulos ESP32 que ofrecen acceso a internet. Tras abarcar un rango más amplio de satélites, en febrero de 2021 se cambiaron el nombre al actual, TinyGs, y lanzaron un nuevo firmware en el que se apreciaba la página web por primera vez, ya que antes todo estaba gestionado por Telegram.

Es necesario mencionar a los fundadores de este proyecto que tras mucho esfuerzo han desarrollado, Germán Martín, José Manuel Galileo y Óscar.

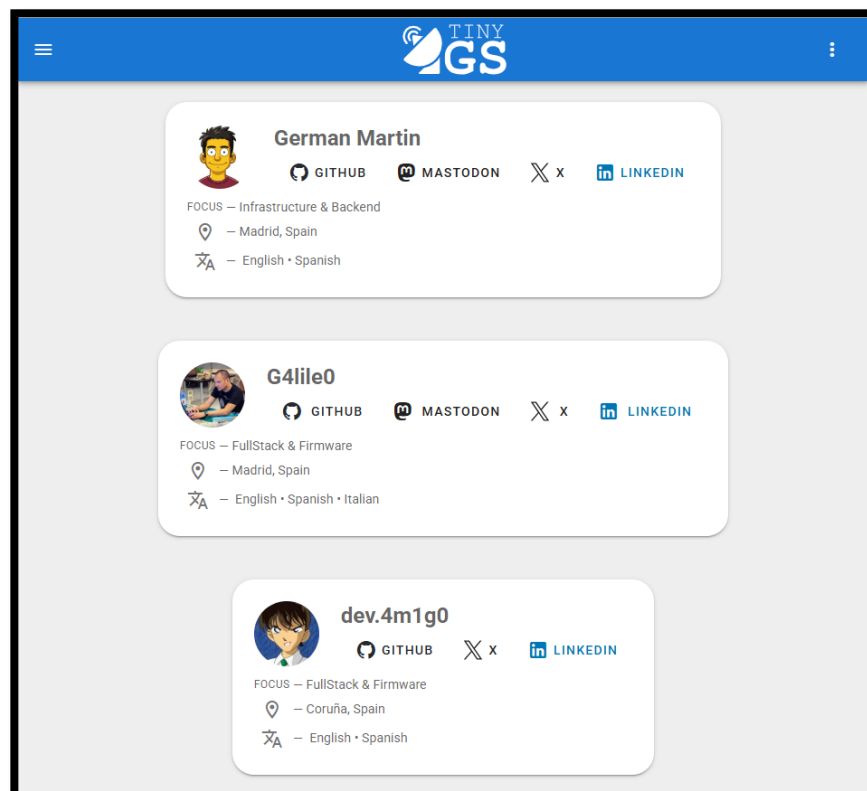


Ilustración 29. Fundadores de TinyGs

En la Ilustración 30 se puede apreciar la arquitectura de componentes:

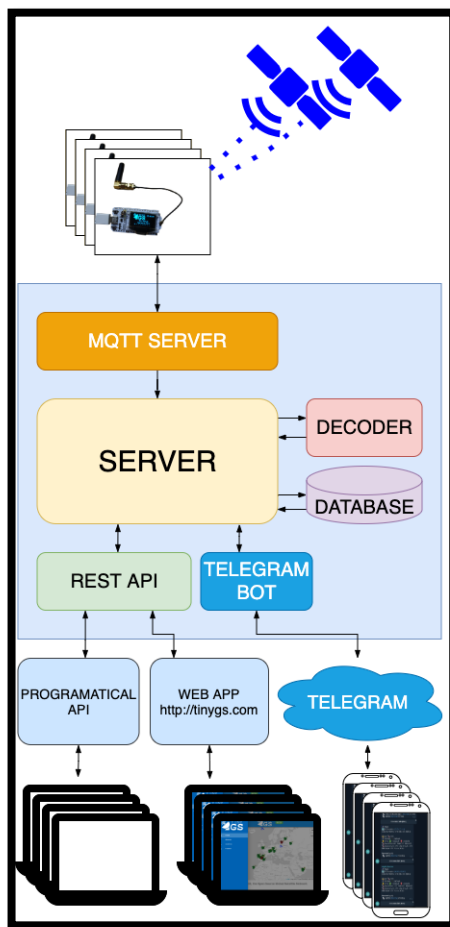


Ilustración 30. Arquitectura de TinyGs [19]

De ese diagrama hay que especificar que [20]:

- Toda la comunicación entre las ground stations o estaciones terrenas y el servicio de la nube se hace a través de un servidor MQTT usando mosquitto como broker. Las estaciones terrenas siguen una serie de topics a la hora de transmitir de forma que, primero emiten un topic en el que describen su configuración interna y su identificación. Después envían un keep alive continuo con la idea de que el servidor tenga toda la información en tiempo real de todas las estaciones para que se pueda plasmar en la web.
- Se usan dos servidores donde se balancea la carga y se usan servicios como node red, la API o el bot de telegram que están desplegados sobre Dockers, lo que hace que sea más liviano el uso de disco y más fácil a la hora de migrarlos. Dentro del segundo servidor hay un servicio de monitorización.
- El módulo decoder es un módulo externo formado por programas que dan los desarrolladores de los satélites o personas externas, encargado de decodificar los mensajes y exportarlos en una estructura de datos legible. Resaltar que node red, cuando llega un mensaje hace uso de este módulo para obtener una estructura legible de la información.
- Para almacenar toda la información se hace uso de una base de datos MongoDB.
- La aplicación web es una single page application en Vue que consulta a la API para extraer la información de los distintos endpoints de node red. En la misma se pueden observar, sin estar registrado, todos los satélites, estaciones terrenas registradas en la plataforma y un historial de los últimos paquetes recibidos por las mismas, tal y como se ve en las Ilustraciones 31, 32 y 33. El resto de información que se observa cuando se está registrado en la página web se adjunta en las siguientes secciones donde se

explica tanto la instalación del firmware como el registro de la estación en la plataforma.

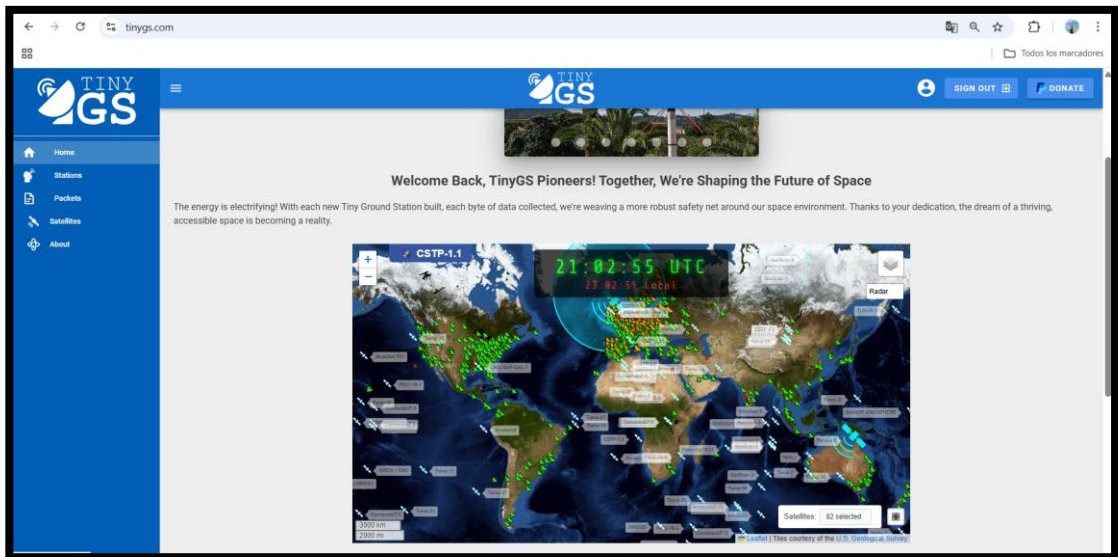


Ilustración 31. Página principal TinyGs

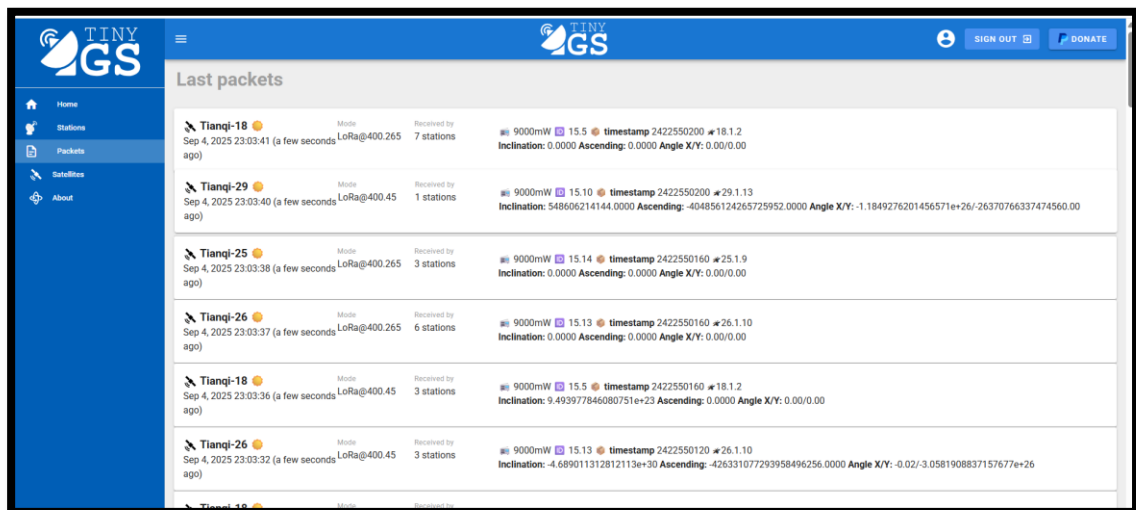


Ilustración 32. Historial de los últimos paquetes recibidos

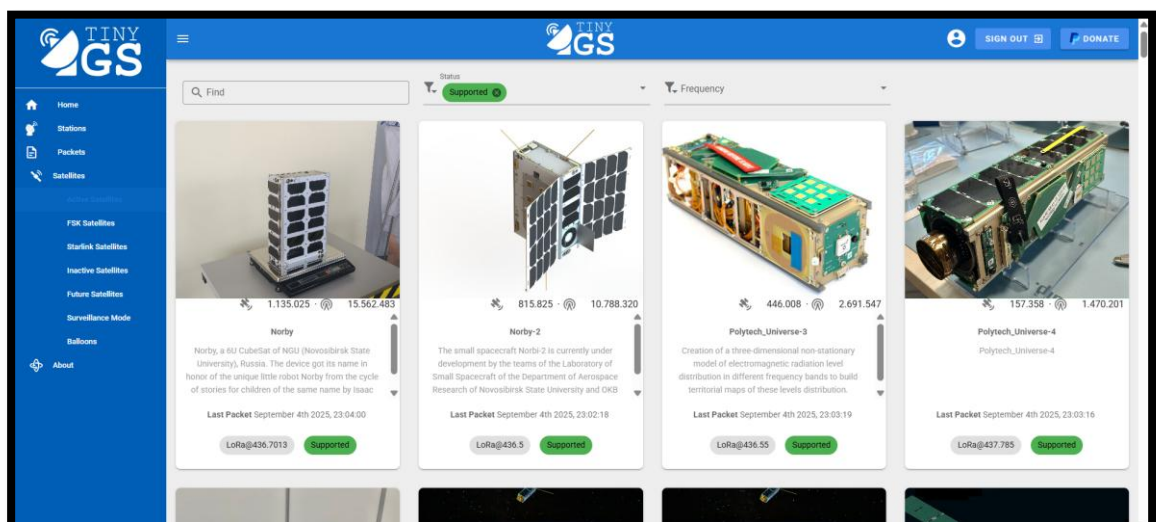


Ilustración 33. Satélites registrados en la plataforma

Resaltar que todos los satélites de los que estamos hablando son de unas dimensiones de 10x10x10 cm por cada unidad, pudiendo ser 1U,2U, ...Y muchos de ellos pertenecen a experimentos tecnológicos.

- El bot de telegram tiene como función principal proporcionar la contraseña tanto de la web como la del servicio MQTT que ayuda a registrar estaciones base, así como otras. Por ejemplo, ver si la estación se registró adecuadamente, entre otras tal y como se ve documentado en el siguiente capítulo.

4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN TERRENA

The fundamental problem of communication is that of reproducing at one point either exactly or approximately a message selected at another point.

- Claude Shannon, 1948 -

En este capítulo vamos a describir los pasos para desarrollar una estación terrena compatible con la plataforma de TinyGs para la recepción de satélites.

Primero se hará el diseño de la antena, para la cual se hará una simulación con el fin de ver las prestaciones que tendría y pasar a la construcción de esta. Posteriormente, se hará una guía con los pasos a seguir para la instalación del firmware en el receptor. La Ilustración 34 muestra una vista general del proyecto a desarrollar.

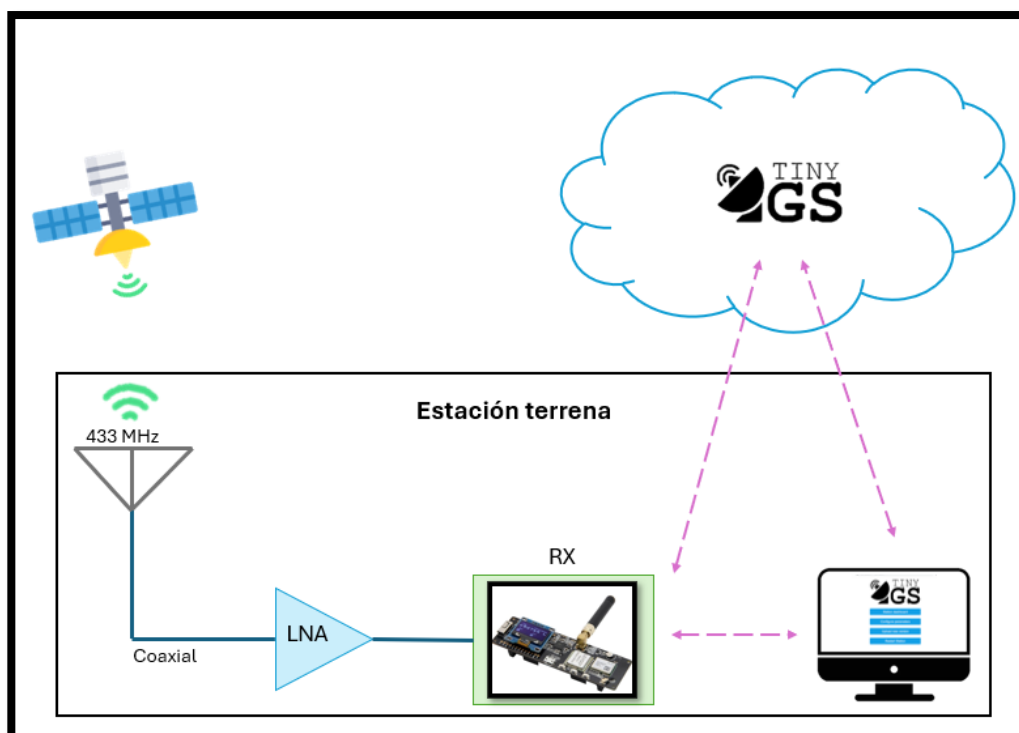


Ilustración 34. Esquema general del proyecto

Es importante aclarar que se ha introducido un LNA que nuestra estación no llevará debido a que el receptor se encuentra muy próximo de la antena y no es necesario en este caso, pero de forma genérica es normal su uso ya que suelen estar a distancias mayores y es necesario amplificar la señal.

4.1 Diseño y construcción de la antena

4.1.1 Elección de la antena

Una antena [21] es una estructura metálica que recibe y/o transmite ondas de radio electromagnéticas mientras que la dirección polarización es la orientación que toma el campo electromagnético de la misma. La mayoría de los satélites que tiene registrada la plataforma de TinyGs tienen polarización lineal, pero vamos a diseñar una antena de polarización circular debido a que muchos satélites van rotando, incluso cambiando de una polarización lineal horizontal a una vertical. Es por este motivo que con una antena lineal obtendremos la máxima ganancia en el momento exacto que coincidan, pero, cuando los planos estén a 90° la señal será mínima. Sin embargo, antenas con polarizaciones circulares son la mejor opción para estos casos ya que, aunque posea una pérdida de unos 6 dB, son más constantes durante todo el pase del satélite. Siguiendo este razonamiento, se ha barajado la posibilidad de usar dos tipos de antena: la eggbeater o la cuadrifilar (QFH).

La primera de ellas, también conocida como batidora de huevo [22] por la forma que tiene, es una antena omnidireccional, es decir, cuyo patrón radia de manera uniforme en todas las direcciones y está formada por dos aros entrelazados con una longitud de $1 \cdot \lambda$ cada uno de ellos con un desfase de 90° para obtener la polarización circular anteriormente comentada.



Ilustración 35. Antena eggbeater

La QFH [23] se puede describir como una antena formada por dos cuadros de diferente tamaño puestos en paralelo y doblados de manera helicoidal, esta disposición hace que no haga falta un desfasador a diferencia del caso anterior ya que las impedancias de los cuadros (100Ω) se adaptan a los 50Ω del cable coaxial RG58 que vamos a usar.



Ilustración 36. Antena QFH

Para la elección definitiva se simularon ambas antenas en 4nec2 [24] a la frecuencia de 433 MHz (véase Anexo A donde se explica cómo se usa la herramienta para simularlas) [25] con el fin de poder comparar sus patrones de radiación y poder tomar una decisión objetiva. En la Ilustración 37 se observa la comparación de los resultados obtenidos:

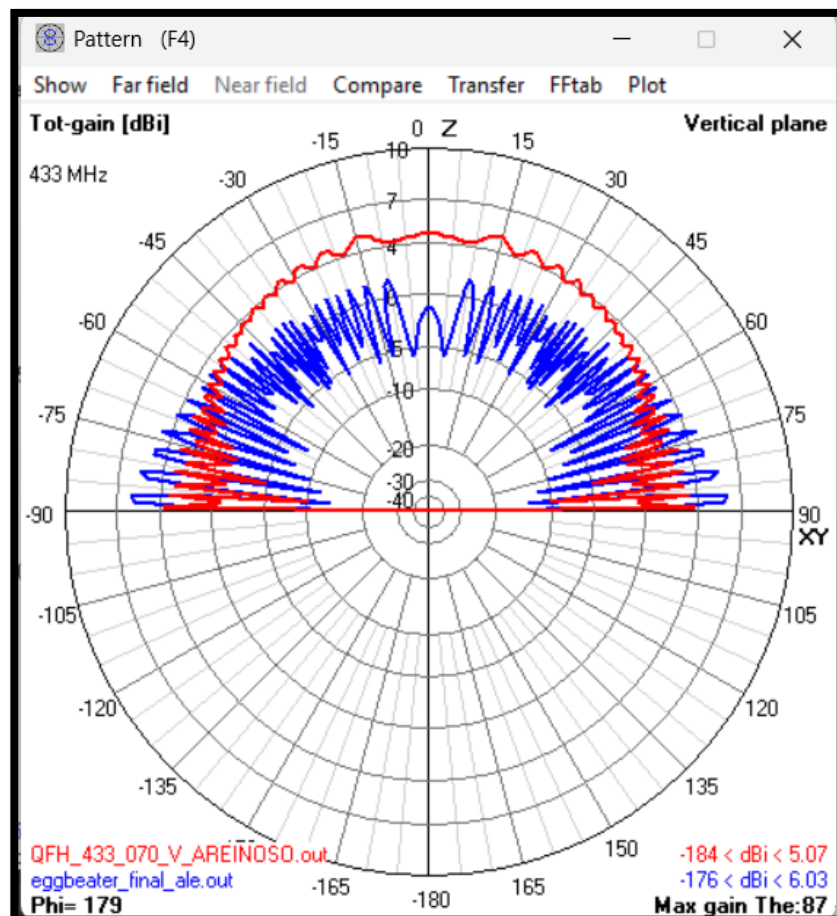


Ilustración 37. Comparación de los patrones de radiación de las antenas QFH y eggbeater

Ambos patrones pertenecen al plano vertical ya que en el horizontal son ambas omnidireccionales. El patrón

rojo corresponde a la QFH y el azul a la eggbeater. Como podemos, observar la antena QFH es más adecuada para los pases altos (ángulos de 90° o cercanos) debido a que tiene una ganancia superior, pero en los pases bajos predomina la eggbeater, que realmente es donde más ganancia hace falta al estar el satélite más lejos. Se escogió la QFH a pesar de todo debido a que se planea que la estación esté ubicada en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, los cuales están rodeados por algunos edificios y se ha preferido priorizar los pases altos.

En definitiva, se diseña una antena QFH para UHF en 433 MHz. Se procederá a detallar más en profundidad su funcionamiento y los cálculos necesarios para su construcción.

4.1.2 Diseño de la antena QFH

Esta antena fue creada por el Dr. C. C. Kilgus perteneciente al laboratorio de física aplicada de la Universidad de Hopkins [26].



Ilustración 38. Con los autores Maxwell y Walter Ozman, W2WGH, observando en el centro, el ingeniero de RCA Randy Bricker (a la derecha) entrega al ingeniero de la NASA Jan King, W3GEY, la antena baliza cuadrifilar hélice de 2304 MHz diseñada por W2DU que voló en el OSCAR 7.

Vamos a empezar analizando las características físicas de la antena en su forma más simple, $\frac{\lambda}{2}$ y que coincide con las vueltas que le daremos a la hora de construirla. Para ello será necesario visualizarla como un circuito en forma de lazo con forma de cuadrado con un perímetro igual a λ , donde cada lado como se observa en la Ilustración 39 mide $\frac{\lambda}{4}$.

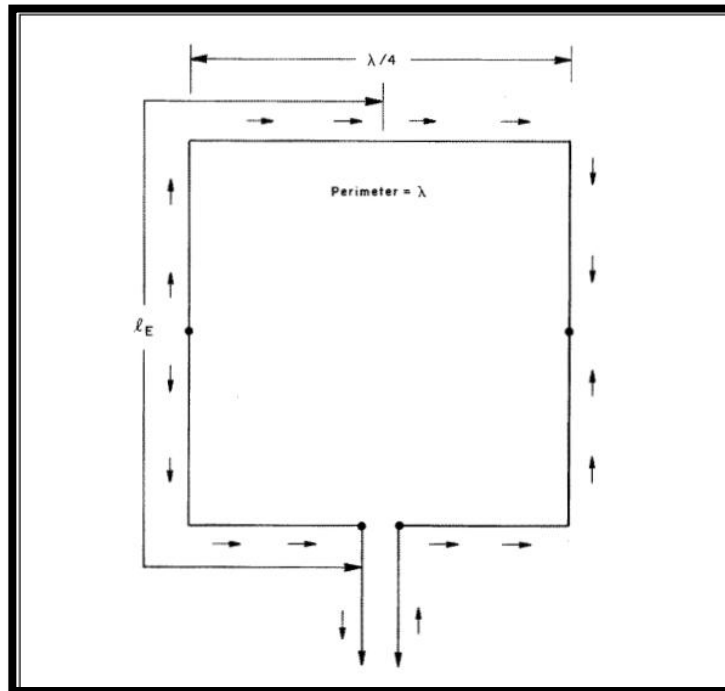


Ilustración 39. Elemento radiante de bucle cuadrado con polarización horizontal

Posteriormente para llegar a la forma de la QFH, se inserta un cilindro imaginario de diámetro $D = \frac{\lambda}{4}$ y manteniendo fijo el lado inferior del lazo, se gira el lado superior con respecto al cilindro, dando lugar a los dos helicoides.

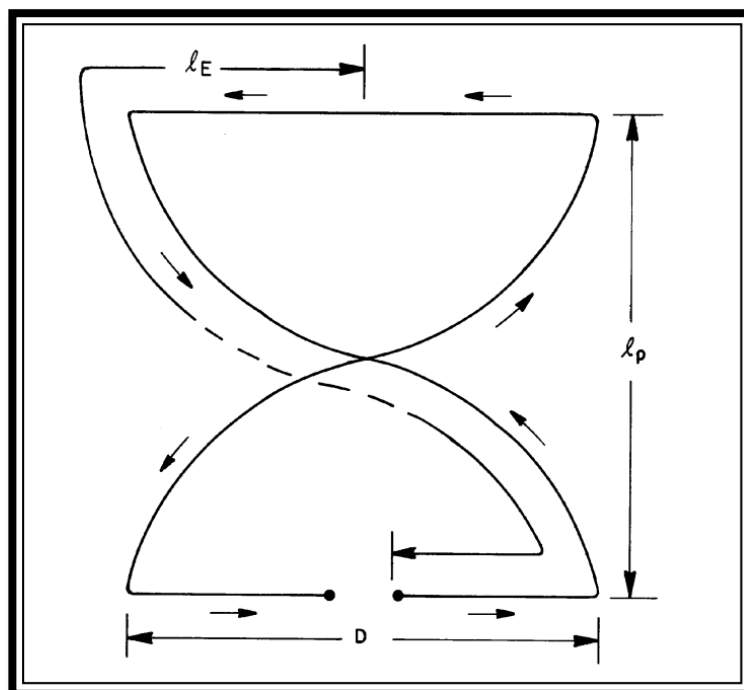


Ilustración 40. Bucle helicoidal bifilar de media vuelta

Como resultado obtenemos dos espiras que variando su largo y su anchura podremos obtener una antena acorde a nuestros requisitos.

4.1.3 Cálculos para la frecuencia de 433 MHz

Para el cálculo de las medidas se usó la calculadora de Jcoppens [27] pero previamente se hizo una serie de cálculos para validar su uso [28].

Lo primero que se hace es averiguar la longitud de onda para la frecuencia de trabajo que queremos:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (11)$$

donde v es la velocidad de propagación que toma el valor de $c = 300 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ y f es la frecuencia de trabajo que es de 433 MHz, tal y como se observa en el siguiente cálculo:

$$\lambda = \frac{300 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{433 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}} = 0'6928 \text{ m} = 692'8 \text{ mm} \quad (12)$$

Esta longitud de onda se verá corregida por el grosor de las varillas. Si hacemos un cálculo aproximado podemos sacar ese factor de corrección, sabiendo que tenemos dos varillas de 4 mm y que estarán separadas unos 4 cm obtenemos el factor de corrección como:

$$f_{corr} = \frac{69'8 + 4 + 4 + 40}{692'8} = 1'06 \quad (13)$$

Posteriormente es necesario calcular las longitudes de los lazos, ya que los dos cuadros que hemos comentado anteriormente si tuviesen la misma longitud no podrían unirse, quedando la alternativa más fácil que es poner uno encima de otro, pero variando la longitud de forma proporcional entre ellos, consiguiendo así que la media de ambas distancias sea la longitud que queremos (sin necesidad de compensar ningún desfase).

Para averiguar ese factor se han usado las fórmulas del Perímetro en λ que aparecen en el capítulo 22 del libro "Reflections III Transmisión Lines Antennas" de Walter Maxwell [30].

$$Perimeter_{sl} = 1'016\lambda \quad (14)$$

$$Perimeter_{ll} = 1'120\lambda \quad (15)$$

que si hacemos la ratio nos da un valor de:

$$ratio_{maxwell} = \frac{1'120}{1'016} = 1'10 \quad (16)$$

El lazo más grande con factor 1.016, resonará a una frecuencia ligeramente más baja que la frecuencia central, y el lazo pequeño con factor 1.120 resuena a una frecuencia algo mayor que la frecuencia central. Eso conlleva que en la frecuencia central cada lazo tendrá una parte real de impedancia y una parte imaginaria (reactancia) que serán de distinto signo en un lazo y en el otro para que se cancelen.

Para el cálculo del lazo largo usaremos la siguiente fórmula:

$$long_{ll} = \lambda \cdot f_{corr} \cdot n_{onda} \cdot 1'120 = 822'49 \text{ mm} \quad (17)$$

Y para el corto:

$$long_{lc} = \lambda \cdot f_{corr} \cdot n_{onda} \cdot 1'016 = 746'11 \text{ mm} \quad (18)$$

siendo el $n_{onda} = 1$ el valor típico.

Ahora se pasa a usar la calculadora de Jcoppens que nos da los siguientes resultados tras meter una serie de parámetros que explicaremos a continuación:

Frecuencia de diseño	433	MHz
Cantidad de vueltas	0.5	
Largo de una vuelta	1	largos de onda
Radio del doblado	5	mm
Diámetro del conductor	4	mm (valor óptimo: 6.5 mm)
Relación diámetro/altura	0.44	
	Calcular	

Ilustración 41. Parámetros a introducir en la calculadora

- **La frecuencia:** toma un valor de 433 MHz ya que es la frecuencia a la que trabaja el receptor que hemos elegido.
- **Cantidad de vueltas:** es de 0.5 porque es la que mejor ganancia nos ofrece, como podemos observar a continuación en las siguientes simulaciones realizadas que se corresponden con las Ilustraciones 42, 43 y 44.

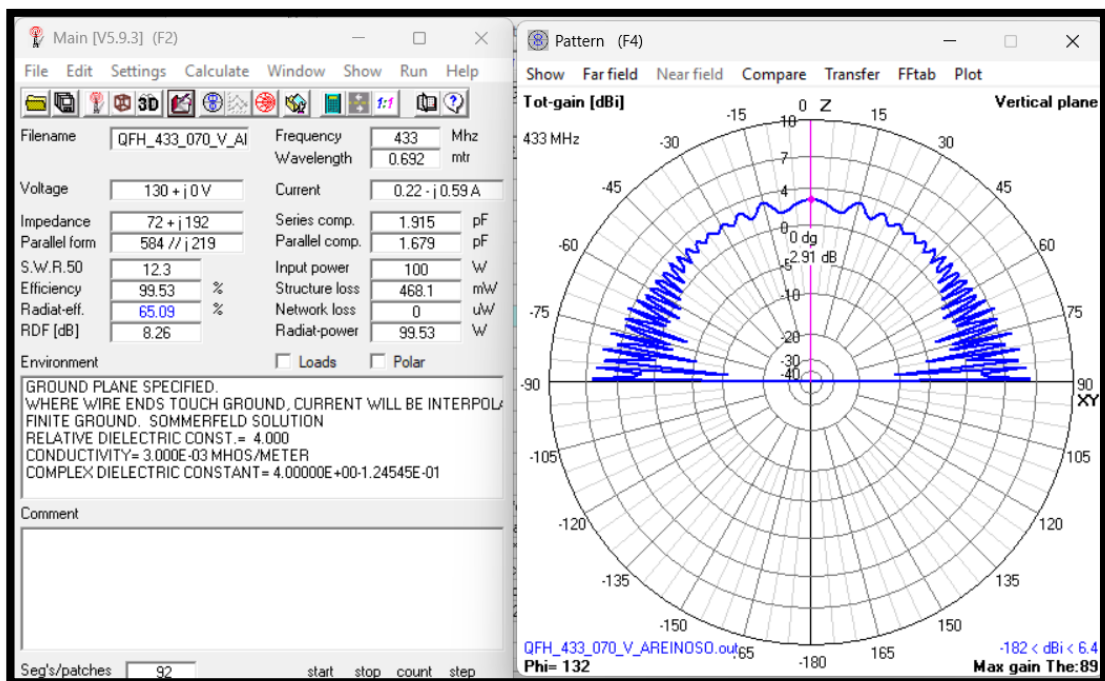


Ilustración 42. Simulación para un número de vueltas de 0.25

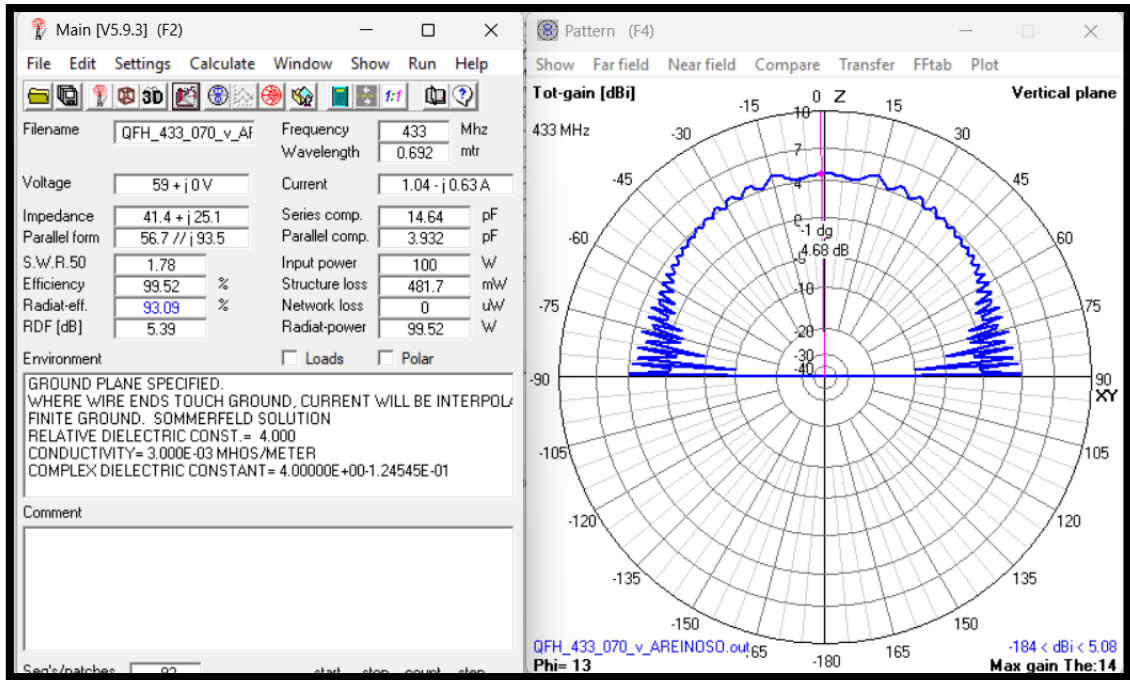


Ilustración 43: Simulación para un número de vueltas de 0.5

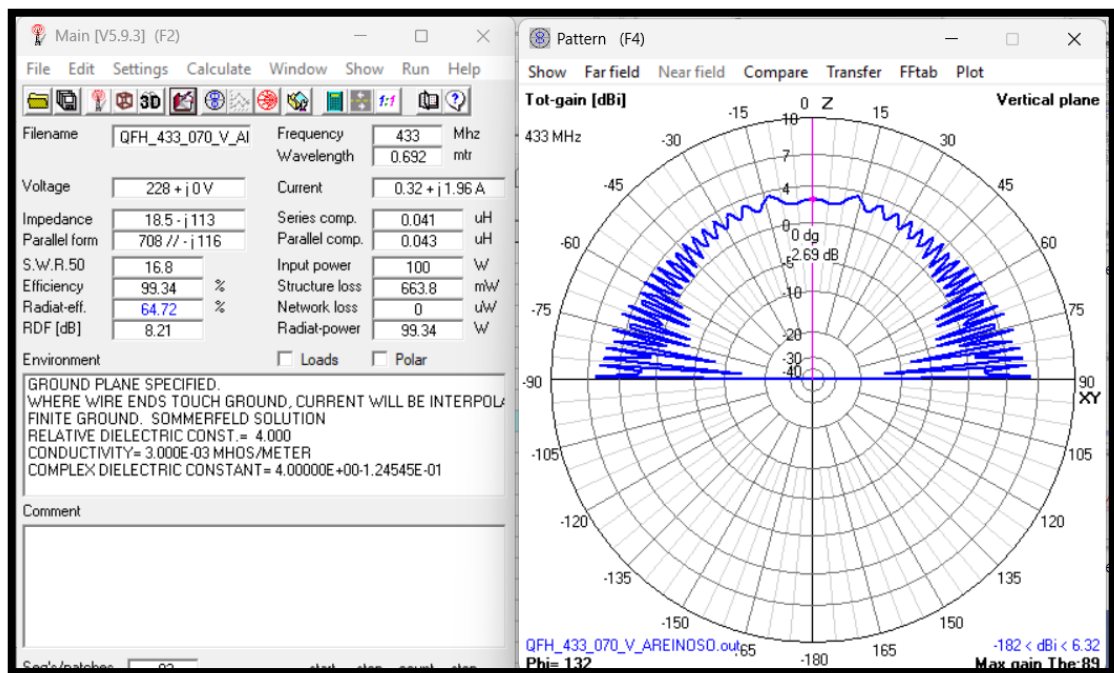


Ilustración 44. Simulación para un número de vueltas de 0.75

- **Largo de una vuelta:** se ha elegido el largo de 1λ ya que es lo más habitual, pero no hubiese habido problema si fuese otro valor.
- **Radio de doblado:** se puso un radio de 5 mm que suele un valor usual.
- **Diámetro del conductor:** nuestras varillas de aluminio que harán de conductor tienen un diámetro de 4 mm.

- **Relación diámetro altura:** este parámetro afecta al diagrama de radiación vertical y al horizontal en bajas elevaciones. Se puso el valor de 0.44 ya que es habitual.

Tras pulsar el botón calcular, obtenemos los resultados mostrados en las Ilustraciones 45 y 46, junto con una plantilla para taladrar que no hemos usado porque se ha preferido hacerlo manualmente.

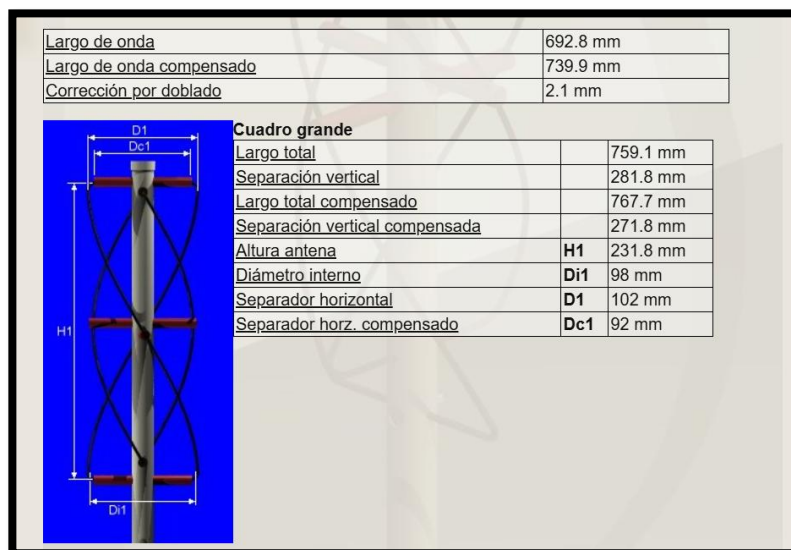


Ilustración 45. Resultados de Jcoppens para el cuadro grande

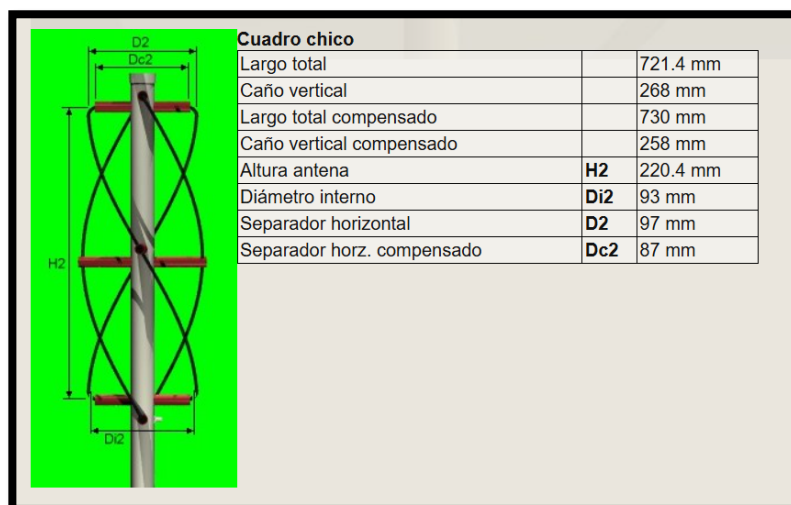


Ilustración 46. Resultados de Jcoppens para el cuadro pequeño

En la parte inferior de la página web hay una breve descripción sobre cada medida y que se ha añadido a continuación para ayudar a la comprensión de estas

- **Largo de onda:** largo de onda calculado de la frecuencia correspondiente.
- **Largo de onda (compensada):** largo de onda calculada de la frecuencia donde el valor compensado refleja el efecto del diámetro del conductor.
- **Corrección por doblado:** valor de la corrección por doblado.
- **Largo total del lazo:** largo total del conductor.
- **Largo total del lazo compensado:** circunferencia total del conductor del cuadro (largo del coaxial). El valor compensado indica el efecto del doblado, y la necesidad de aumentar el tamaño del cuadro

levemente.

- **Separación vertical (compensado):** largo de uno de los conductores verticales, donde el valor compensado indica el tamaño del caño sin los codos.
- **Separador horizontal (compensado):** el tamaño de la parte horizontal. Nuevamente el valor compensado resta el espacio ocupado por los codos.
- **Altura antena:** altura del cuadro con el giro ya impuesto.
- **Diámetro interno:** el diámetro del cilindro a usar para la confección del helicoide.

La calculadora sin embargo toma factores de 1.026 para el lazo largo y 0.976 para el corto dejando una ratio de:

$$ratio_{jcoppens} = \frac{1'026}{0'976} = 1'05 \quad (19)$$

Si comparamos esta ratio con el de Maxwell vemos que la diferencia es de 0.05 por lo que podemos declarar que la calculadora es válida. De hecho, nuestros cálculos se acercan a la calculadora de forma aproximada ya que la diferencia causada por ese 0.05 hace que no salgan los valores exactos, pero podemos darle la validez para continuar con ella y pasar al montaje de la antena.

4.1.4 Construcción

Para la construcción de la antena se han utilizado los siguientes materiales:

- 1x tubo de aluminio de 6mm de diámetro.
- 2x varillas de aluminio de 4mm de diámetro.
- 1x tubo de PVC de 50 mm de diámetro exterior junto con un casquillo de unión (tapón + manguito).
- Cable coaxial de RG58 (50 Ω) de varios metros.
- 4xtornillos de 3.5 mm.
- 4x terminales de anillo.
- 1x limpiador de PVC.
- 1x pegamento de PVC.
- 1x crimpadora SMA.
- 1x conector SMA.

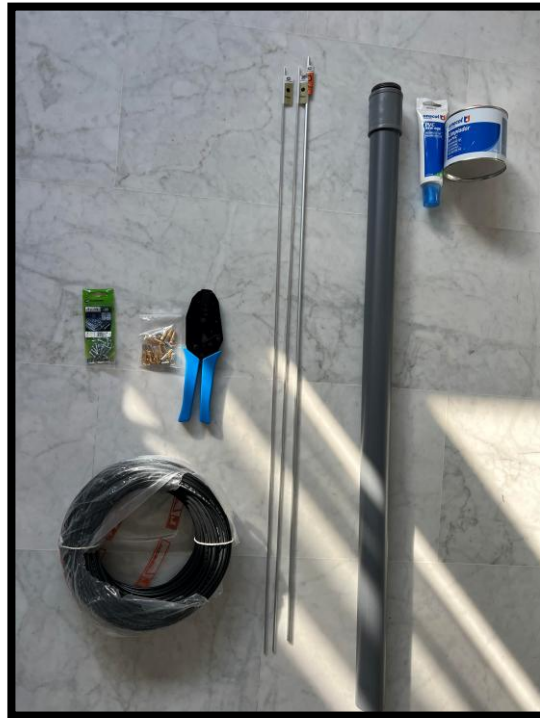


Ilustración 47. Materiales necesarios

Todo el proceso que se va a llevar a cabo ha estado basado en la calculadora de Jcoppens y en la guía de Alejandro Fernández [29].

Antes de empezar a realizar la antena se rehicieron los cálculos que Alejandro había ido desarrollando, pero a la frecuencia de 433 MHz y se observó que la diferencia era de 0.2 mm por lo que conseguir esa precisión era prácticamente imposible y se siguieron las medidas descritas en la guía.

El primer paso fue pegar el casquillo al tubo de PVC y el manguito para adaptarlo al tubo, para ello previamente se quitó la posible suciedad con el limpiador de PVC y después se pegó dejando actuar varios segundos. Este casquillo nos permitirá tener las conexiones protegidas, pero accesibles (las fotos son con el montaje ya hecho).



Ilustración 48. Vista tapa exterior pegada y cerrada.



Ilustración 49. Tapa exterior abierta

Después, se procedió a realizar los agujeros de 6mm a lo largo del PVC necesarios para los tubos y para el balun, del cual hablaremos más tarde. Es importante medir desde arriba del casquillo como podemos ver en las cotas del esquema de la Ilustración 50 y saber que las medidas están en milímetros.

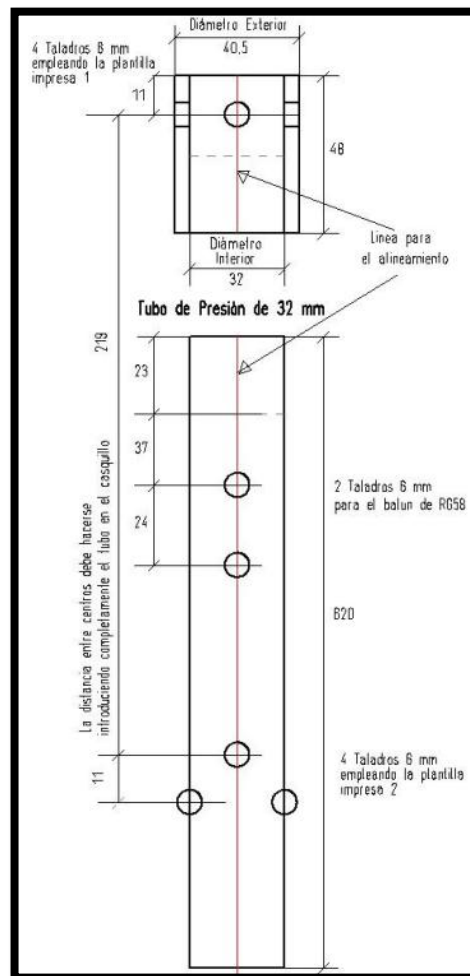


Ilustración 50. Plantilla de taladrado del tubo central de PVC

Luego se pasa al lazo grande, para lo que es necesario cortar el tubo de aluminio de forma que nos quede una pieza de 91 mm y dos más pequeñas de 39.5 mm, donde a estas últimas les haremos un agujero de 2.5 mm a una distancia de 5 mm desde el extremo.

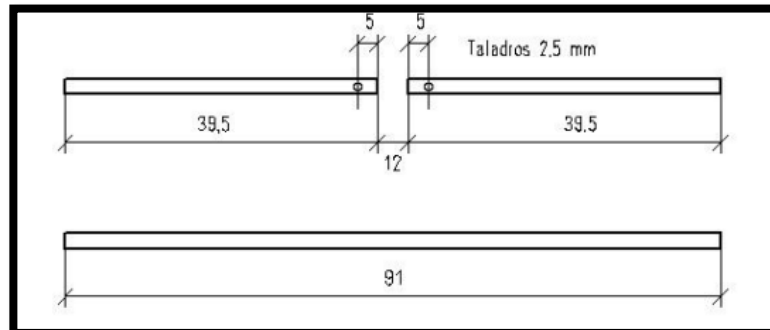


Ilustración 51. Plantilla de corte para los tubos del cuadro grande

También hay que cortar 2 varillas de 327 mm donde los primeros 20 mm de los extremos se dejarán fijos para introducir en el PVC. Es recomendable dejar marcados con rotulador tanto esa medida como el radio de doblado que habíamos puesto en la calculadora de 5 mm. Con estas varillas, lo ideal para ayudar a doblarlas es usar algo que sea resistente a la fuerza que hagamos sobre las mismas, en este caso se usó un cubo de pintura para poder facilitar el doblaje.

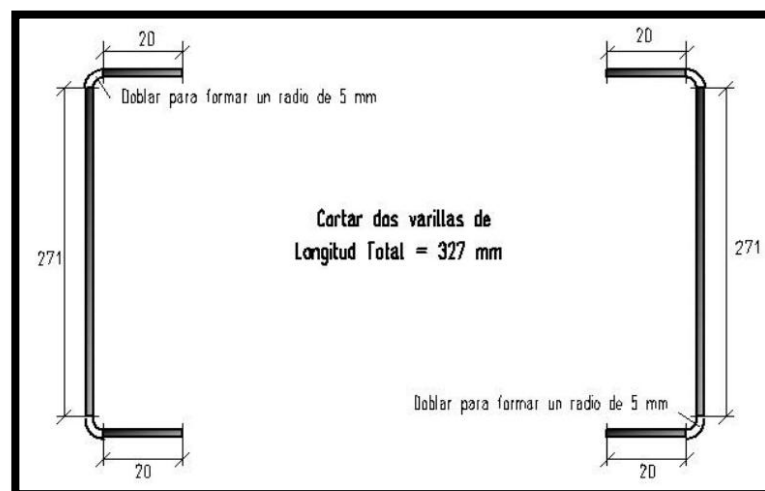


Ilustración 52. Plantilla de corte para las varillas del cuadro grande.

Para el lazo corto hacemos el mismo proceso anteriormente descrito, pero, cambiando únicamente la longitud de los tubos y de las varillas de modo que se debe tener: un tubo de 86.3 mm y dos más pequeños de 37.2 mm, y dos varillas de longitud total de 313 mm como se ve en las Ilustraciones 53 y 54.

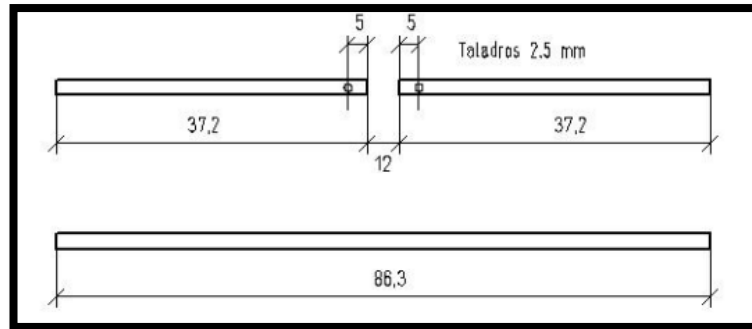


Ilustración 53. Plantilla de corte para los tubos del cuadro chico.

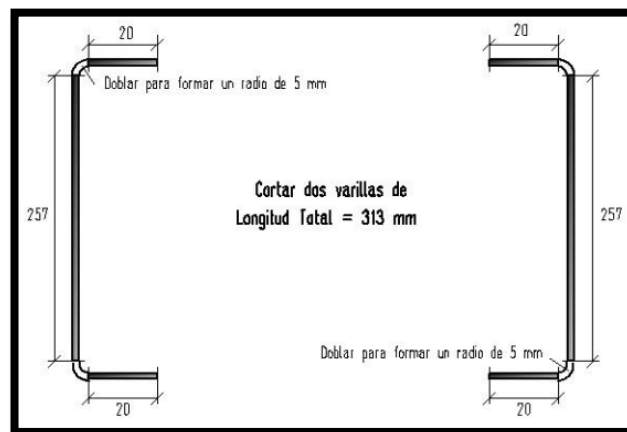


Ilustración 54. Plantilla de corte para las varillas del cuadro chico

Tras realizar los pasos anteriormente comentados, debemos insertar los tubos en los agujeros que hicimos de forma que tengamos los 4 de menor tamaño alternando entre los perteneciente al lazo corto y al largo en la parte superior de la antena y los de mayor tamaño en los agujeros inferiores, situando el más corto de ellos ligeramente por encima del grande. Es importante dejar los agujeros que se hicieron en los tubos pequeños mirando hacia arriba cuando se coloquen dentro del PVC.

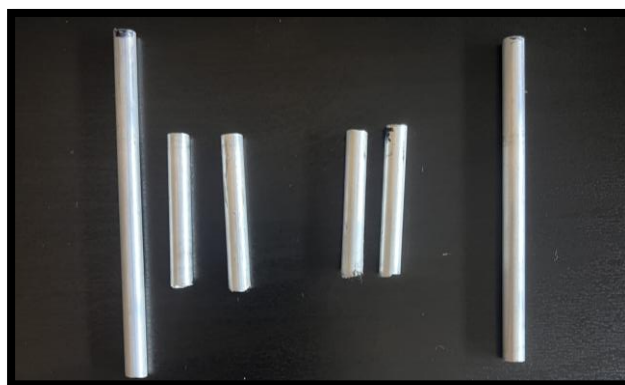


Ilustración 55. Tubos ya cortados y perforados



Ilustración 56. Colocación de los tubos correcta. Vista exterior.

Además, como se aprecia en la imagen 56 se debe añadir el balun de la siguiente manera: introducimos un extremo del coaxial en el agujero inferior y damos 4 vueltas girando hacia la izquierda si son vistos desde la vista de arriba ya que así conseguimos la polarización circular derecha para finalmente introducirlo de nuevo por el agujero superior y sacar el sobrante por la parte superior de la antena para las conexiones. La finalidad del balun es bajar la relación de onda estacionaria (ROE), la energía que se transmite parte vuelve por la malla y como medida de protección se hace esas espiras para evitarlas. En este caso el balun se colocó por si en el futuro se usaba además para transmisión, para la recepción no influye.

El siguiente paso es hacer los lazos para los que nos basaremos en la Ilustración 57 que será clave tanto para las conexiones como para la colocación adecuadas de los cuadros. Tras nombrar los tubos e insertar en ellos las varillas correspondientes según la letra del abecedario debemos conectar el extremo inferior de la varilla en su sitio correspondiente. Por ejemplo, si tenemos el lazo grande A ya colocado, debemos llevar la otra parte de la varilla al tubo inferior correspondiente, pero al lado opuesto, es decir en el lado de C para que haya dado media vuelta. Resaltar la importancia de que las varillas vistas desde arriba deben girar en sentido contrario a las agujas del reloj para garantizar la polarización circular derecha.

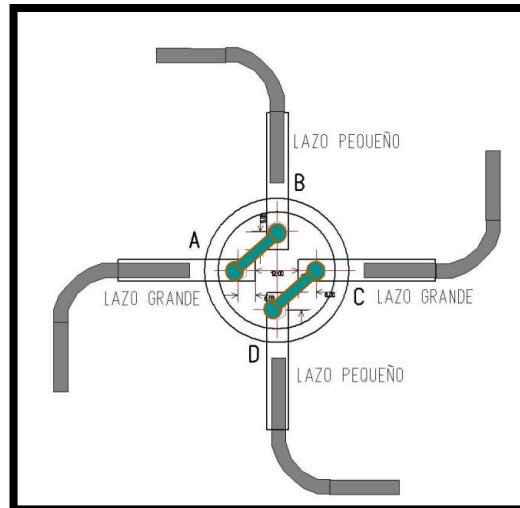


Ilustración 57. Orientación y conexionado

Si seguimos con el proceso anterior descrito nos debe de quedar algo similar a la Ilustración 58 tras haber unido todas las varillas en su lugar adecuado y de la manera más simétrica posible. No debe preocupar que no quede perfecta ya que su finalidad es de recepción y hay mayor margen de error en caso de que la simetría no esté adecuada.



Ilustración 58. Colocación de las varillas formando media vuelta

Ya sólo queda hacer las conexiones. Previa construcción con el tubo de PVC de 50 mm, se intentó hacer en un tubo de 40 mm de diámetro tal y como ponía en la guía seguida, pero, debido a la dificultad de trabajo para

soldar y mover cables, se escogió uno de mayor amplitud (el de 50 mm) para una mayor facilidad. Lo primero que hay que hacer con el sobrante de coaxial que se dejó en la parte superior de la antena, es separar el vivo de la malla, colocando el vivo en A y B, y la malla en C y D. Para ello, se puso el vivo rodeando los tornillos, tanto en el lado A como en el lado B, y se introdujo cada uno en un terminal de anillo para ser atornillados en los agujeros del tubo. Con el soldador se une el cañón de cada uno de los dos ojales para que queden eléctricamente unidos y se repite el mismo proceso con C y D, pero con la malla. Es aconsejable con un multímetro comprobar que exista entre A y B un cortocircuito al igual que en C y D. También se debe verificar un circuito abierto entre A y C, A y D, B y C, y B y D. Dicho de otro modo, cortocircuito en las partes soldadas y circuito abierto en las que no.



Ilustración 59. Resultado del conexionado final tras soldar.

Ya podemos decir que tenemos nuestra antena acabada a falta de soldar y crimpar el conector SMA macho al final del cable coaxial para tener el punto de terminación que se usará tanto para conectarlo a la placa como al analizador vectorial de redes nanoVNA (necesario para ver su rendimiento).

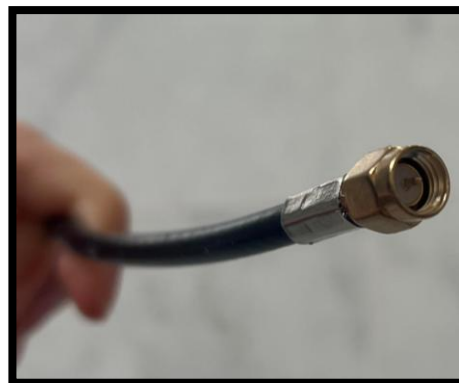


Ilustración 60. Crimpado del cable coaxial con el conector SMA.

Antes de medir el rendimiento con la nanoVNA [30], es necesario e importante calibrar la misma para obtener una medida fiable (véase el Anexo B) para profundizar sobre este equipo de medida. Tras ese proceso, obtenemos el siguiente resultado en el que podemos ver que tenemos una ROE de 1.41, el cual es un resultado bastante bueno al estar cercano a 1. La ROE es un valor que indica la adaptación de impedancia relativa entre la antena y la línea de transmisión (coaxial en este caso), siendo 1 una adaptación perfecta, es decir ambas están a 50Ω . Nuestra impedancia, como vemos en la carta de Smith, es de 63.5Ω , que es un valor que es acorde a la ROE que nos ha salido y aceptable. Resumiendo, podemos deducir que la antena se nos quedó algo larga para

433 MHz, pero es totalmente válida para el objetivo de este proyecto ya que solo se usará la antena en modo recepción. Igualmente, si en un futuro se decide usar para transmisión, con la ROE analizada también sería posible.

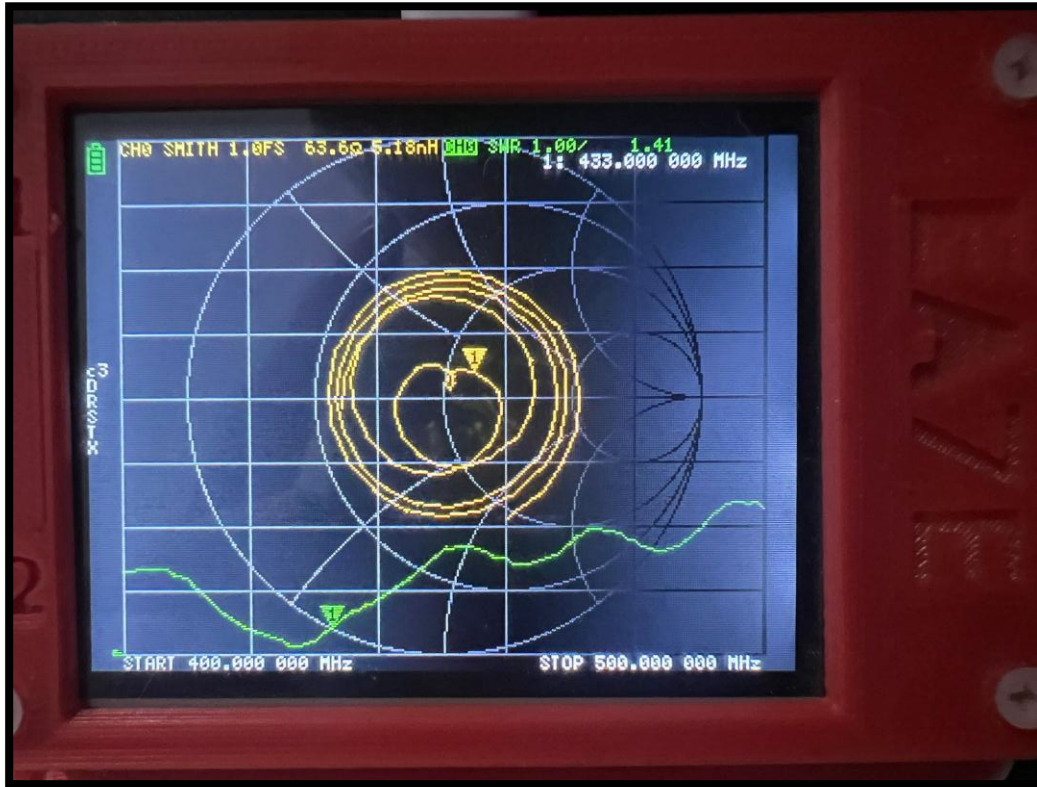


Ilustración 61. Resultados de la NanoVNA. Carta de Smith y ROE.

4.2 Elección y configuración de la estación base

Para el diseño de la estación base nos decantamos por la placa LILYGO T-Beam v1.2 Methastasic ESP32 LoRa con pantalla OLED. El módulo ESP32 [31] es un chip que proporciona conectividad Wi-Fi y Bluetooth para dispositivos IoT. Fue creado por la empresa Espressif Systems de bajo costo, que posee una gran potencia y su consumo es mínimo.

En la página de TinyGs hay un listado con todas las placas aptas para su firmware [32], y que es recomendable visitar antes para asegurarse de la validez de la placa y donde la nuestra aún no había sido lo suficientemente testada, siendo ese el motivo de la elección con el fin de ayudar a que avancen en la configuración de las distintas placas.

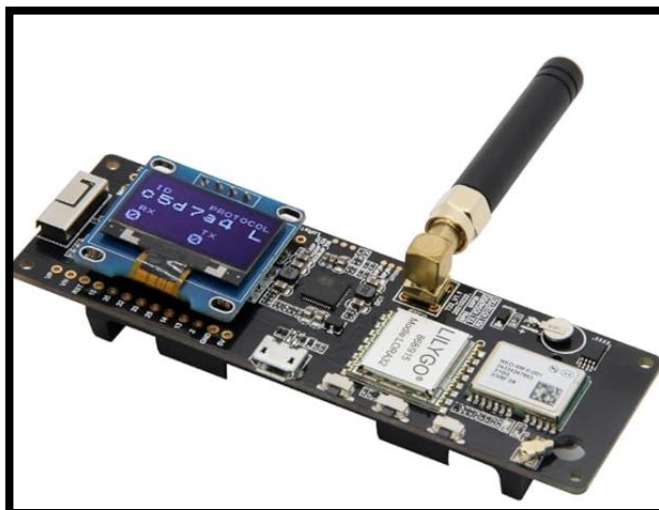


Ilustración 62. Placa de la estación base. Modelo LILYGO T-Beam v1.2

Como podemos observar en la Ilustración 62, la placa tiene dos formas de ser alimentada que son a través de un Micro USB o con una pila del modelo 18650, que se encuentra en la carcasa detrás de la placa [33].

Además, cuenta con una antena 3D impresa, situada en el extremo izquierdo justo al lado de la pantalla, que es la encargada de proporcionarle WiFi a 2.4GHz y Bluetooth. En este caso, la hemos sustituido por una de mayor potencia, usando para ello el conector IPX adicional que trae la placa.

La placa lleva además un regulador interno, AXP2101, que se encarga de reducir la potencia de 5 V a 3.3 V, que es lo que la placa es capaz de soportar.

Con el fin de que la estación sea lo más autosuficiente posible, se conectará un panel solar al Micro-USB, pero para ello se debe primero averiguar cuánto consume la placa de forma aproximada para elegir la opción adecuada.

4.2.1 Especificaciones técnicas de la placa

Lo primero que se hará es ir viendo los datasheets de cada uno de los componentes que componen la estación, empezando por el ESP32 de cuya hoja de características sacamos la siguiente tabla:

Work Mode	Min	Typ	Max	Unit
Transmit 802.11b, DSSS 1 Mbps, POUT = +19.5 dBm	—	240	—	mA
Transmit 802.11g, OFDM 54 Mbps, POUT = +16 dBm	—	190	—	mA
Transmit 802.11n, OFDM MCS7, POUT = +14 dBm	—	180	—	mA
Receive 802.11b/g/n	—	95 ~ 100	—	mA
Transmit BT/BLE, POUT = 0 dBm	—	130	—	mA
Receive BT/BLE	—	95 ~ 100	—	mA

Ilustración 63. Consumo de corriente RF en modo activo del ESP32 [34]

Aunque nuestra estación sólo reciba, con respecto al WiFi tenemos transmisión y recepción por lo que nos quedaremos con el que nos vaya a dar un consumo más alto que es el primer campo de la tabla con un valor de 240 mA. Si hacemos el cálculo para un voltaje de 3.3 V nos da un consumo de potencia de 792 mW.

Respecto al consumo de la pantalla oled, en el datasheet no aparece así que se ha obtenido a través de fabricantes de módulos [35] basados en esta pantalla, dónde se ve que tiene un consumo de 20 mA de forma genérica, y eso

nos da un consumo de potencia de 66 mW.

El GPS NEO-6M en su datasheet, concretamente en la sección de requerimientos de potencia, vemos que tiene un máximo de 67 mA que multiplicados por 3.3 V nos da un valor de consumo de potencia de 221.1 mW.

Parameter	Symbol	Module	Min	Typ	Max	Units	Condition
Max. supply current ¹⁵	Iccp	All			67	mA	VCC = 3.6 V ¹⁶ / 1.95 V ¹⁷
	Icc Acquisition	All		47 ¹⁹		mA	

Ilustración 64. Requerimientos de corriente del GPS NEO-6M [36]

Por último, en el AXP2101, en la sección de características eléctricas de la hoja del fabricante, vemos que la corriente es de 40 µA cuando está apagado. No se ha podido evaluar el consumo cuando está activo porque depende de los reguladores y de ahí que tomemos el valor anteriormente comentado que si lo multiplicamos por 3.3 V nos da una potencia de 132 µW.

Symbol	Parameters	Test Conditions	MIN	TYP	MAX	UNIT
QUIESCENT CURRENTS						
I _{BAT}	Battery discharge current	no VBUS, BATFET Disabled, with only RTCLDO on		40		µA

Ilustración 65. Características eléctricas del AXP2101

Al sumar cada uno de los consumos individuales de los componentes mencionados, se obtiene de forma aproximada cuánto consume nuestra estación base que es: 792 mW + 66 mW + 221.1 mW + 132 uW= 1079.232 mW = 1.079W.

La placa solar que se ha visto da una potencia máxima de 3 W, que es margen suficiente para que funcione la placa y pueda cargar con el excedente la pila. No hará falta ningún diodo para hacer el balanceo entre una fuente de alimentación a otra ya que se hace de forma interna por el regulador como hemos visto en el datasheet.

4.2.2 Configuración del firmware

El siguiente paso es instalar el firmware de TinyGs accediendo al instalador web, donde podemos hacerlo de dos formas: de manera automática o manual.

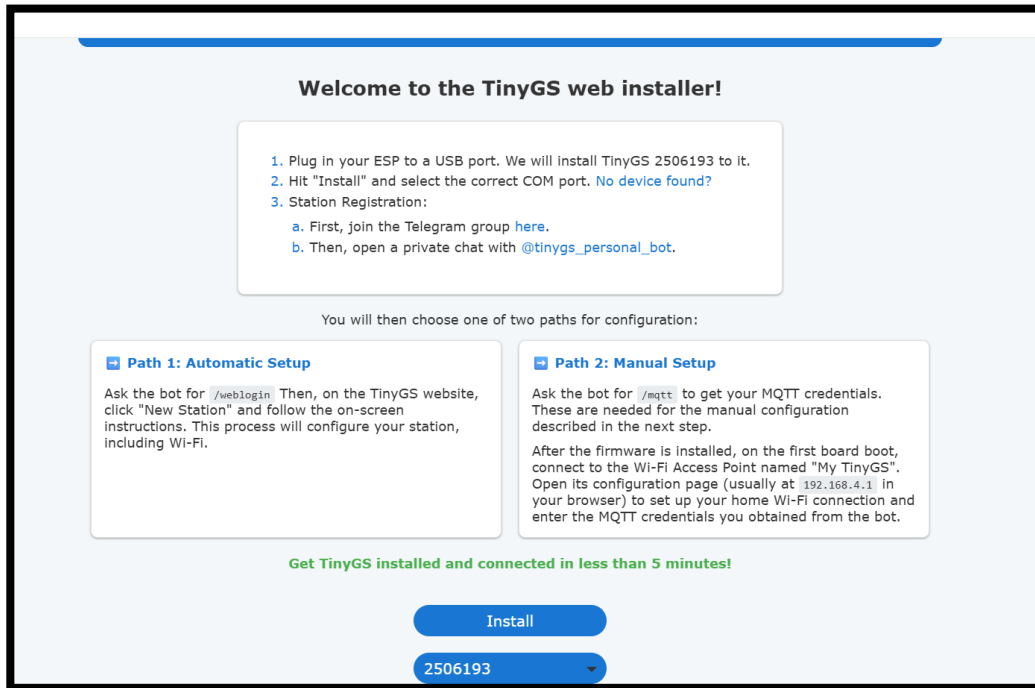


Ilustración 66. Página principal del instalador del TinyGs

Para ambas opciones se ha de conectar la placa a un puerto del portátil y asegurarse del puerto COM en el que se encuentra ya que se debe seleccionar tras darle al botón de instalar. Después de hacer eso, aparece la siguiente ventana flotante que se muestra en la Ilustración 67, donde habrá que pulsar o clicar en “INSTALL TINYGS”.

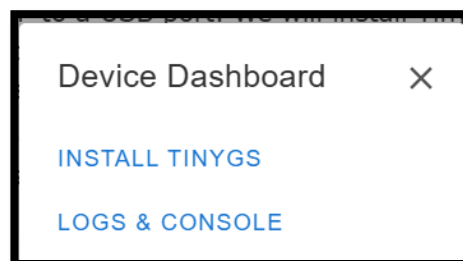


Ilustración 67. Instalación paso 1

Se borra todo el firmware que hubiera anteriormente, seleccionando la casilla de “Erase device” y se procede a instalarlo.

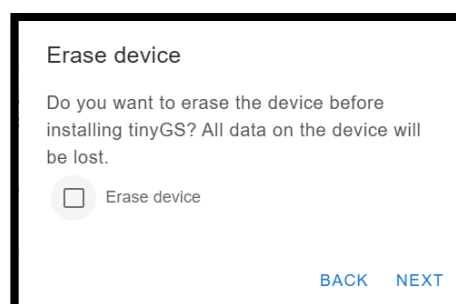


Ilustración 68. Instalación paso 2

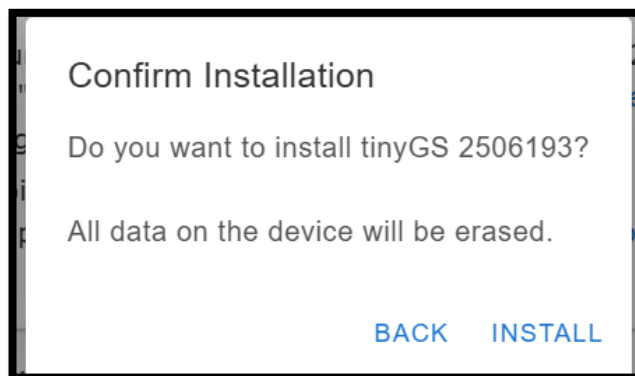


Ilustración 69. Instalación paso 3

Si todo va bien, se debe ver un mensaje de que la instalación se completó y que se debe configurar el WiFi.

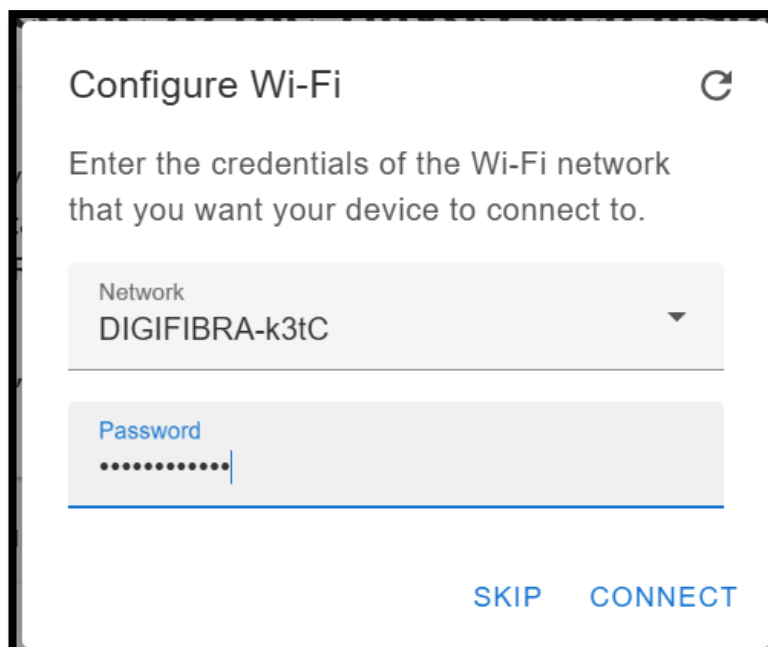


Ilustración 70. Configuración de la red

Ya con el firmware instalado se puede ver el dispositivo y sobre todo que la radio está activa. Es normal, como se puede ver en la Ilustración 72, que el servidor MQTT aún no esté activo porque no se introdujeron las credenciales del bot de Telegram.

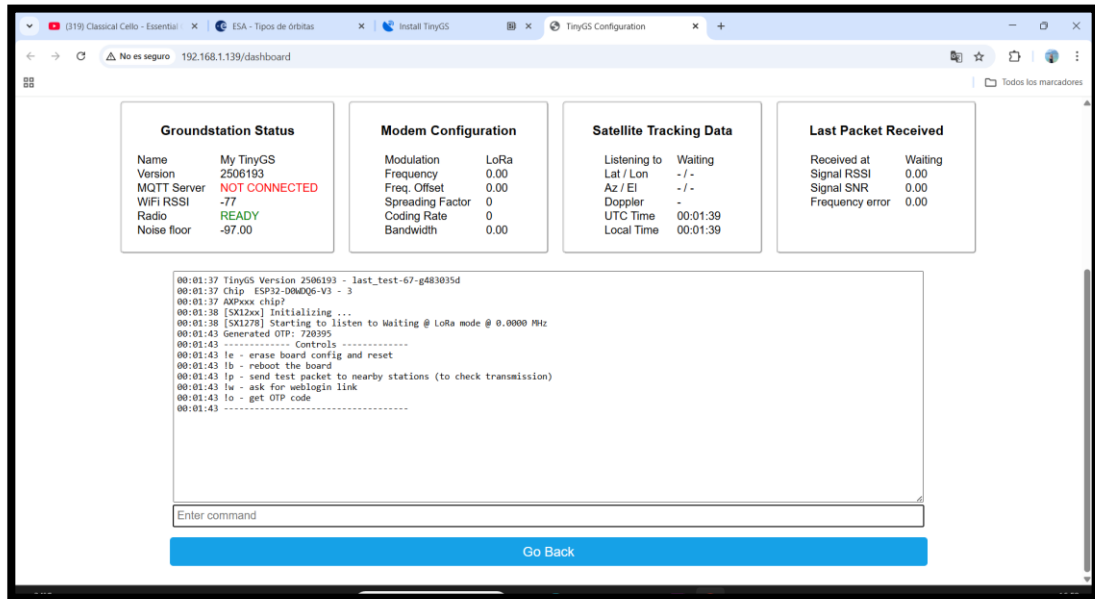


Ilustración 71. Dashboard tras el registro

Se puede observar en los mensajes de la terminal que no nos reconoce el chip, lo que es debido a que las nuevas placas llevan el chip AX2101 que está siendo más problemático a la hora de configurar la estación base. Los creadores de TinyGs están trabajando para solventarlo y ha habido algunos avances, pero, ese contenido está fuera del alcance de esta memoria, ya que no afecta al funcionamiento de la estación sino que sólo afecta a la pantalla oled que no tendrá el funcionamiento requerido correcto. En el dashboard de la Ilustración 72, si se clicca en “Go Back” se consigue llegar a la pantalla principal donde se pueden apreciar distintas opciones.

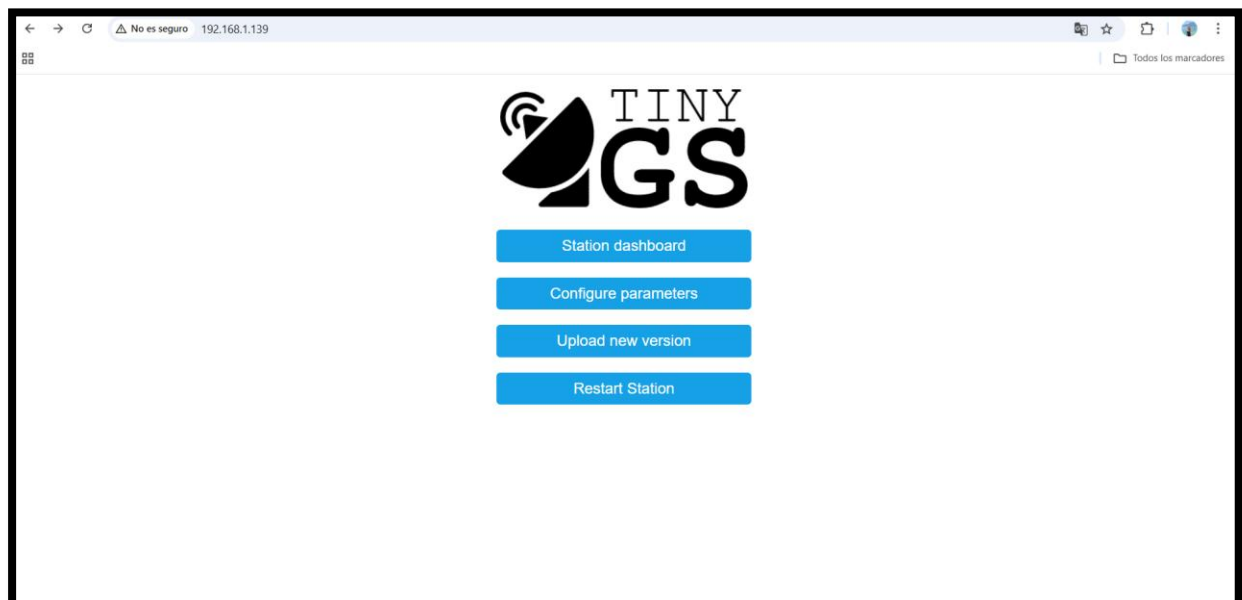


Ilustración 72. Pantalla principal

Si no se quisiera configurar el WiFi en ese momento o si dejara de estar disponible la red, hay una opción para entrar en la pantalla principal que es accediendo al punto de acceso que crea la placa. Es importante recalcar que ya se había registrado la estación y por eso la red tiene el nombre que se le había proporcionado a la estación, pero si no, debería aparecer como My TinyGs.



Ilustración 73. Red local configurada

Una vez conectados, si se escribe en nuestro navegador la IP 192.168.4.1 se puede acceder a la pantalla principal de la estación tal y como se ve en la *Ilustración 59*.

Por último, para poder declarar la estación en la base de datos de TinyGs hace falta comunicarse con el bot de Telegram que se puede encontrar poniendo @TinyGs_personal_bot en la aplicación y escribiendo /start.

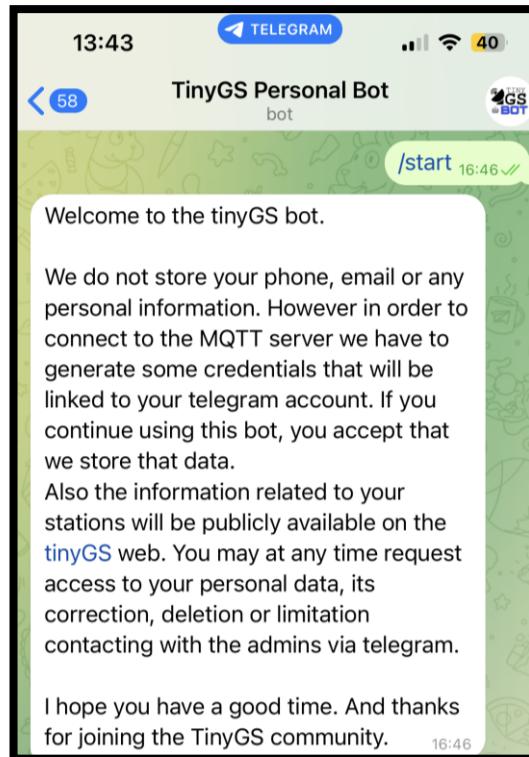


Ilustración 74. Inicio del bot de Telegram

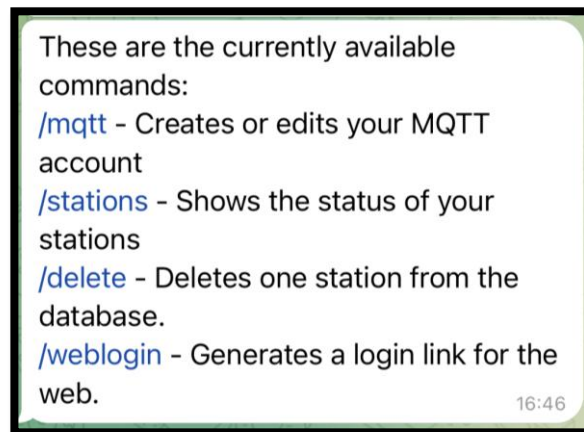


Ilustración 75. Menú bot de Telegram

4.2.2.1 Vía automática

La vía automática se hace a través del enlace del `/weblogin` que redirige a la siguiente página donde, tras registrar el correo electrónico, aparecerá la consola del usuario en la que se podrá crear la nueva estación pulsando el botón correspondiente como se observa en la Ilustración 76.

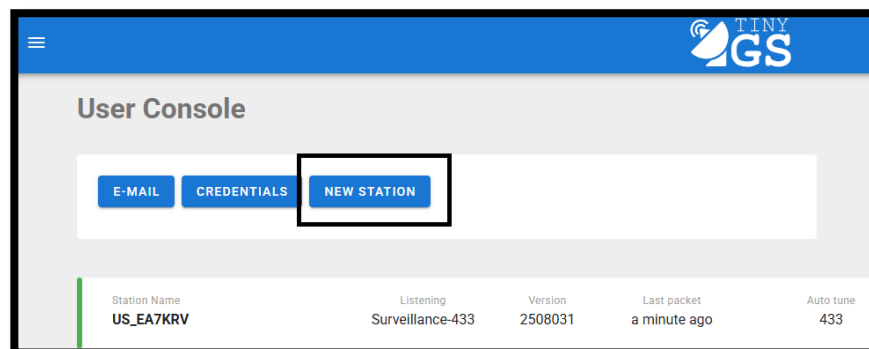


Ilustración 76. Nueva estación desde la consola del usuario.

Tras hacer clic, se despliega una ventana para insertar la información de la estación como el nombre, el código OTP y la contraseña.

New Station Information

1. Visit installer.tinygs.com to create a new station.
2. Wait for the firmware to be loaded.
3. Enter your Wi-Fi credentials when prompted.
4. An OTP code will appear - use this code to register your station here.

Station Name OTP (One-Time Password)

Location Latitude Location Longitude

Local Admin Password Confirm Local Admin Password

Time Zone

Map showing location pin over Spain.

Ilustración 77. Configuración nueva estación vía automática.

El código OTP se encuentra en la terminal que se aprecia en la Ilustración 71 y es el que se debe introducir. Es importante recalcar que es temporal y si la placa se reinicia tendrá otro valor. Tras darle a guardar en el botón inferior la estación queda registrada.

4.2.2.2 Vía manual

La otra forma de registrar la estación es clicando en la Ilustración 72 a la opción de configurar parámetros donde, en la posterior ventana aparecerán una serie de campos a rellenar en los que se encuentra las credenciales MQTT.

System configuration

GroundStation Name (will be seen on the map)
My TinyGS

Password for this dashboard (user is admin)

WiFi SSID
DIGIFIBRA-k3IC

WiFi password

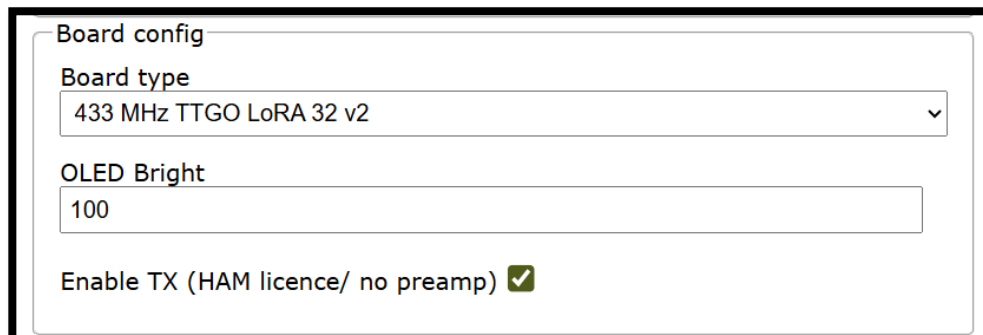
Latitude (3 decimals, will be public)
0.000

Longitude (3 decimals, will be public)
-0.000

Time Zone
Europe/Madrid

Ilustración 78. Configuración nueva estación vía manual.

Es importante aclarar que, aunque el programa seleccione el tipo de placa, para nuestro caso es necesario poner la que aparece en la Ilustración 79 para que tenga el funcionamiento correcto y se pueda empezar a recibir paquetes. Además, se ha seleccionado que se habilite la transmisión porque la autora de este Trabajo Fin de Grado cuenta con la licencia de radioaficionado, pero la casilla se debería dejar en blanco.



Board config

Board type
433 MHz TTGO LoRA 32 v2

OLED Bright
100

Enable TX (HAM licence/ no preamp)

Ilustración 79. Elección del tipo de placa

Tras darle al botón de apply en la parte inferior ya se tendría la estación registrada y en funcionamiento. Tan sólo queda esperar con paciencia hasta recibir nuestro primer satélite. Como comprobación de que ha ido todo bien tanto en esta vía como en la anterior, se recomienda preguntar al bot de Telegram escribiendo /stations para ver el estado de la estación como podemos apreciar en la Ilustración 80.

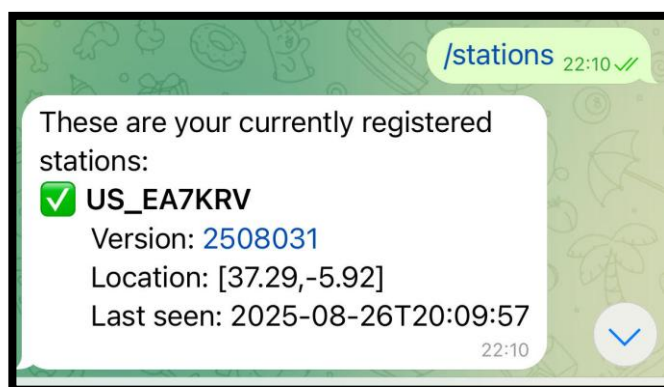


Ilustración 80. Confirmación de la estación vía bot Telegram

4.3 Resultados

A continuación, se procede a explicar lo que aparece en la interfaz de usuario tras la creación y registro de nuestra estación. Lo primero que se observa es un resumen donde se ve el estado en el que se encuentra la estación, es decir si está encendida o apagada, el tipo de antena que se usa, la distancia más lejana a la que ha recibido un paquete sin error, el número de paquetes confirmados y el número de paquetes de telemetría, así como qué satélite está escuchando en ese mismo momento, entre otros parámetros de interés. Se ha dejado un margen de 10 días para poder recopilar toda la información y paquetes posibles.

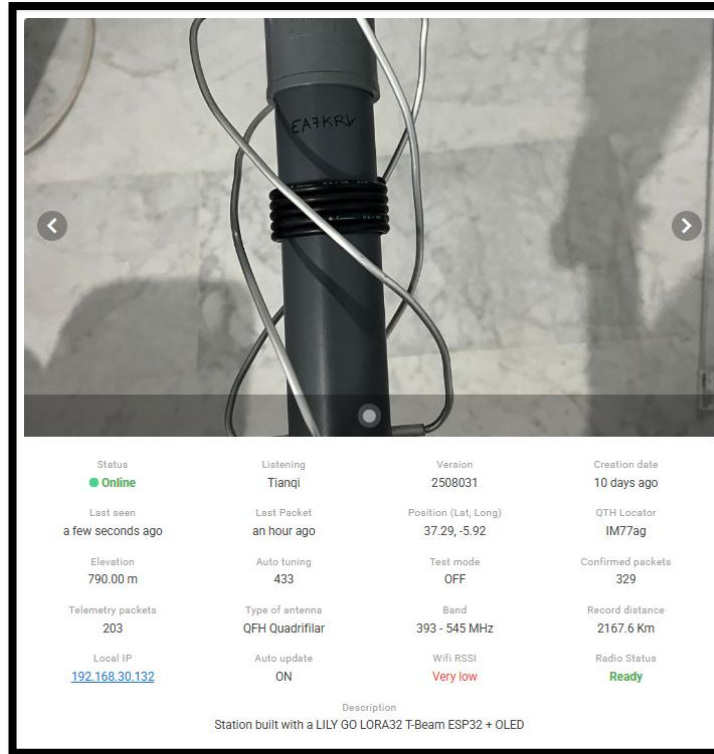


Ilustración 81. Página principal de la estación del usuario

Si se clicha sobre el campo Local IP que aparece en la Ilustración 81, se redirige a la misma pantalla que aparece en la Ilustración 72. Si después de eso, se clicha sobre el dashboard, se puede observar ahora cómo se está escuchando algún satélite o no, si hay datos, etc. En la Ilustración 82 se puede observar en la consola una serie de datos en hexadecimal que corresponde a la telemetría recibida por el satélite.

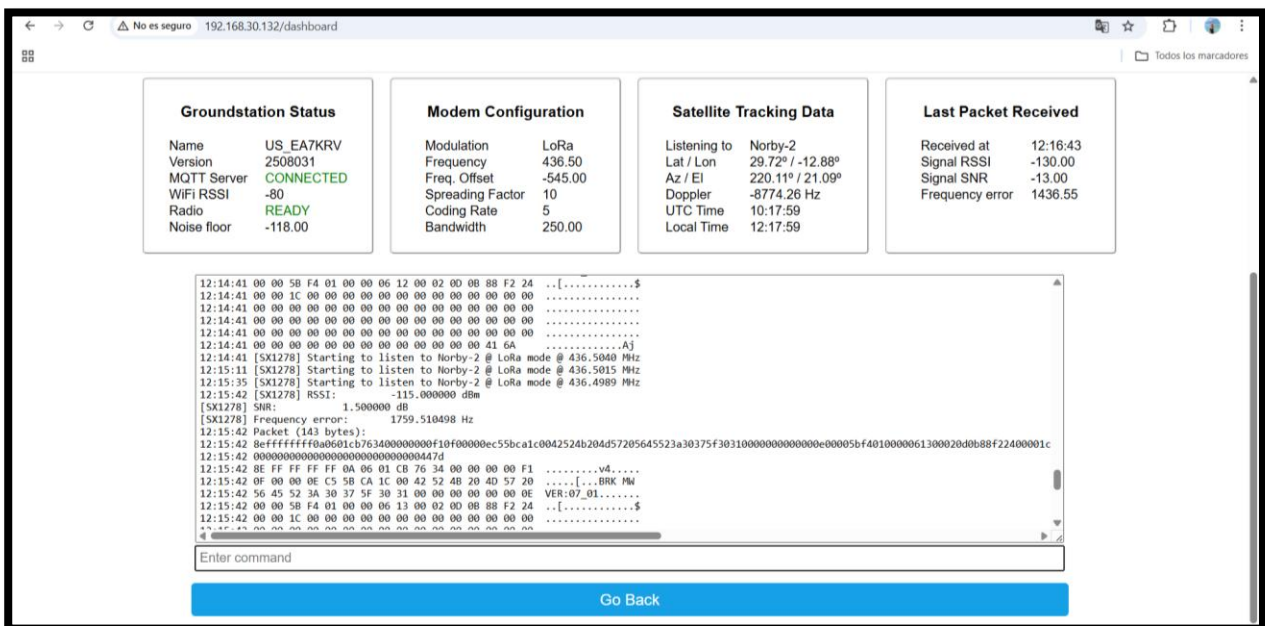


Ilustración 82. Dashboard cuando se recibe un satélite

Si apareciese que está escuchando “Surveillance-435” o similar (puede ser otro número distinto al 435), significa que no ha marcado ningún satélite objetivo, si no que está escuchando en esa frecuencia (435 MHz en este caso) con el fin de captar alguno.

Satellite Tracking Data	
Listening to	Surveillance-435
Lat / Lon	- / -
Az / El	- / -
Doppler	-
UTC Time	08:44:09
Local Time	10:44:09

Ilustración 83. Surveillance-435

Por otro lado, tenemos un mapa en 3D de la Tierra en el que se puede ver tanto la estación registrada como hacer un seguimiento de los pases de los distintos satélites que tiene la plataforma. Como se puede observar en la Ilustración 81, en la captura anterior estábamos escuchando al satélite llamado Tianqi, y aquí podemos confirmar que es el que más cercano se tenía en ese momento, así como ver por dónde pasa. Algo muy útil en caso de querer reorientar la antena.

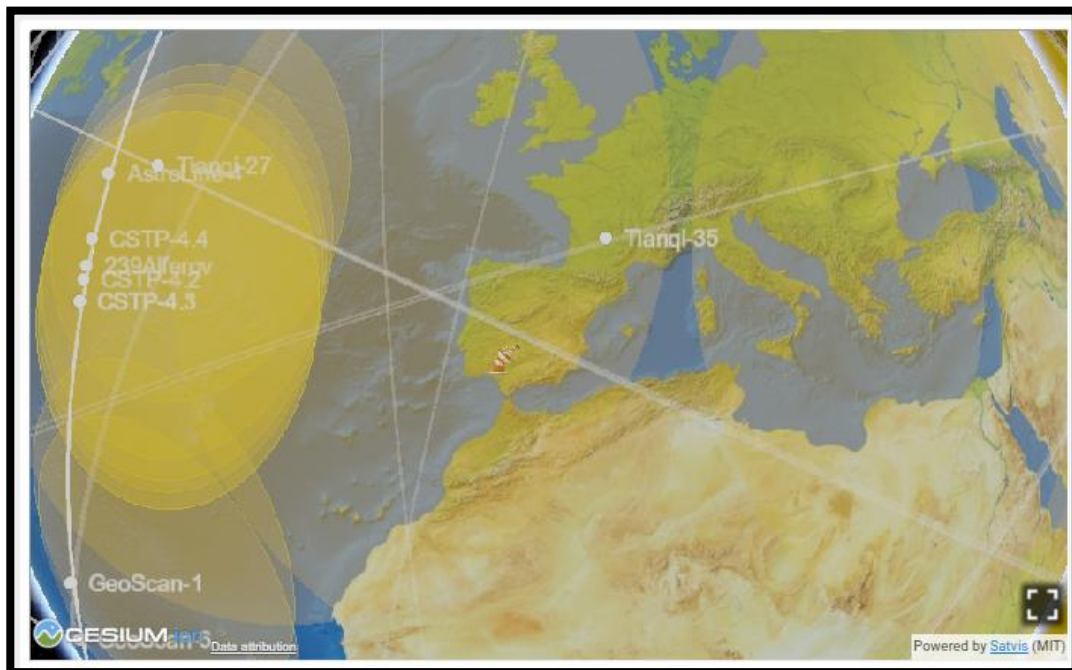
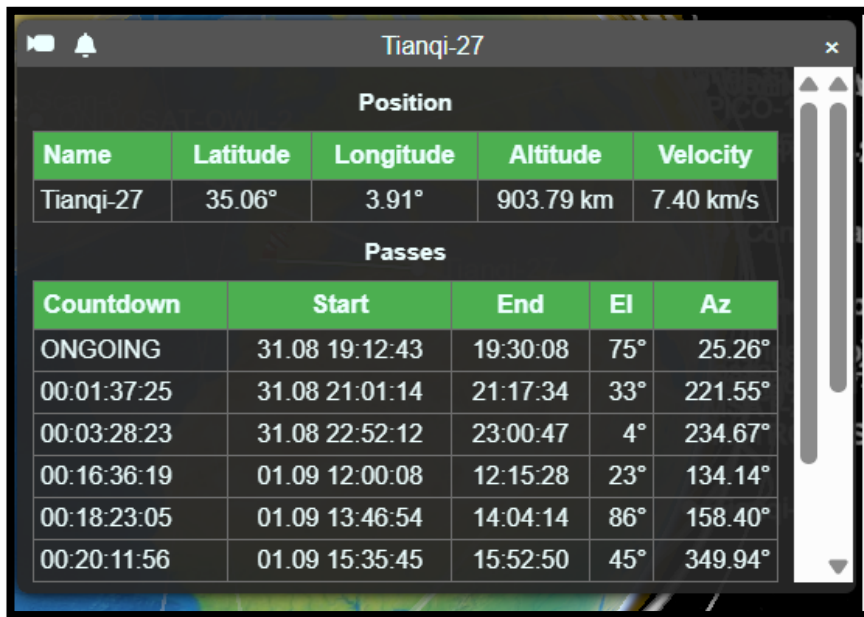


Ilustración 84. Mapa 3D de seguimiento satelital

Además, si se clicca encima del satélite, en este caso el Tianqi-27, podemos observar en tiempo real su posición, altitud, velocidad y los distintos pases que ha tenido con respecto a nuestra estación.



Position				
Name	Latitude	Longitude	Altitude	Velocity
Tianqi-27	35.06°	3.91°	903.79 km	7.40 km/s

Passes				
Countdown	Start	End	EI	Az
ONGOING	31.08 19:12:43	19:30:08	75°	25.26°
00:01:37:25	31.08 21:01:14	21:17:34	33°	221.55°
00:03:28:23	31.08 22:52:12	23:00:47	4°	234.67°
00:16:36:19	01.09 12:00:08	12:15:28	23°	134.14°
00:18:23:05	01.09 13:46:54	14:04:14	86°	158.40°
00:20:11:56	01.09 15:35:45	15:52:50	45°	349.94°

Ilustración 85. Información proveniente del mapa 3D

Por otro lado, la web cuenta con un mapa en el que se puede situar de manera visual de manera visual todos los satélites de los que se ha ido recibiendo telemetría (puntos verdes) así como aquellos en los que hubo error de redundancia (puntos rojos). Si no se quisiese mostrar los recibidos con CRC error, se puede filtrar en el propio mapa. Por otro lado, si se clicca por ejemplo en uno de los puntos se puede ver qué satélite es, la distancia a la que estaba, con qué elevación, potencia, etc.

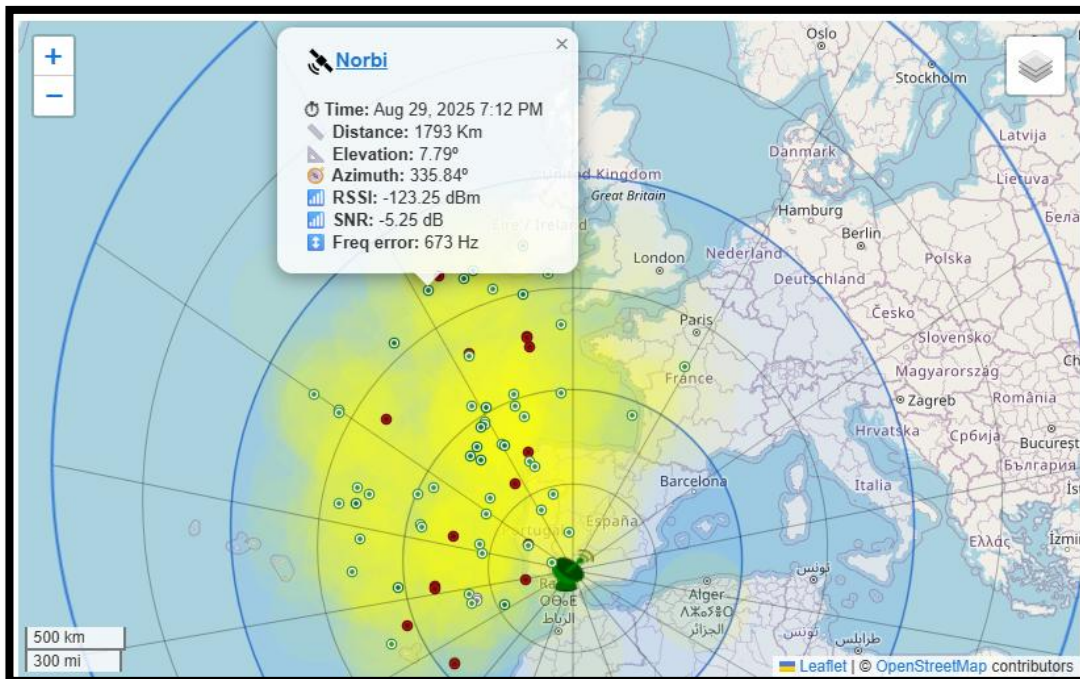


Ilustración 86. Grid con el historial de los satélites recibidos.

Además, se visualiza un gráfico de colores en la Ilustración 87 en el que se observa la cantidad de paquetes

recibidos y a que satelite pertenece en un dia en concreto. Por ejemplo, al dejar el cursor arriba podemos observar que el dia 22 de agosto se recibieron 8 paquetes del FossaSat-2E19.

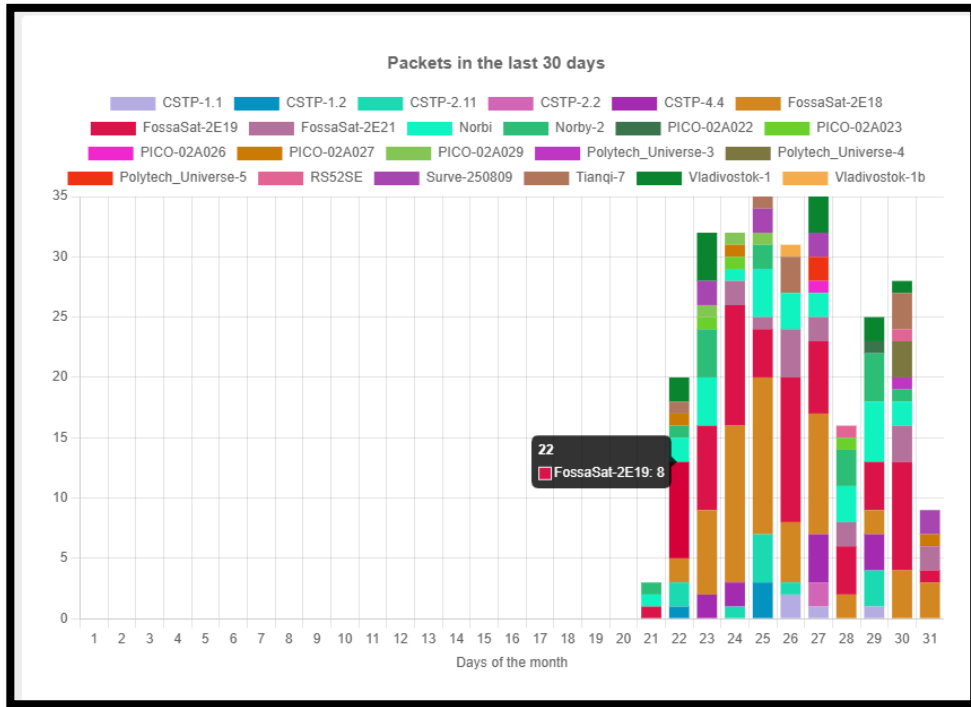


Ilustración 87. Gráfico de la telemetría recibida

También, hay un historial al final de la página de todos los satélites recibidos desde la creación de la estación. La Ilustración 88 se muestra las últimas 6 horas y se puede ver la potencia con la que el satélite estaba emitiendo, la SNR con la que lo recibimos y si se recibió con error. Es normal de vez en cuando recibirlos con error de CRC, ya que no siempre se dan las circunstancias de recibir correctamente los paquetes. Respecto a la SNR, se puede ver que suele ser negativa y esto es debido a que hay más potencia de ruido que de señal, pero incluso en estos casos es posible recibir el paquete gracias a la robustez de LoRa frente al ruido.

Satellite	Mode	Power	Distance	Elevation	RSSI	SNR	Doppler Server / 1GS	Freq. Error / 1GS offset	CRC Error	Received by
Surve-250809	LoRa@437.306	--	795Km	36.32°	-126.75 dBm	-7.75 dB	823 / -334 Hz	-13885 / -818 Hz		11 Stations
Surve-250809	LoRa@437.306	--	796Km	36.24°	-125 dBm	-7 dB	1020 / 445 Hz	-13197 / -818 Hz		15 Stations
Unknown	LoRa@400.283	--	--	--	-125 dBm	-11 dB	-- / -- Hz	-56137 / -818 Hz	●	1 Stations
FossaSat-2E21	LoRa@401.7	1000mW	1449Km	14.84°	-133 dBm	-13 dB	-2692 / -2747 Hz	627 / -818 Hz		11 Stations
Unknown	LoRa@401.7	--	1485Km	14.18°	-135.25 dBm	-15.25 dB	3418 / 4383 Hz	1739 / -818 Hz	●	18 Stations
PICO-1B-7	LoRa@450.1875	631mW	1536Km	12.43°	-133.5 dBm	-12.5 dB	-343 / 17 Hz	3639 / -818 Hz		13 Stations
FossaSat-2E18	LoRa@401.7	1000mW	839Km	34.98°	-131.25 dBm	-12.25 dB	-4105 / -4160 Hz	871 / -818 Hz		17 Stations
FossaSat-2E18	LoRa@401.7	1000mW	765Km	39.96°	-122.75 dBm	-3.75 dB	-476 / -10 Hz	1445 / -818 Hz		38 Stations
FossaSat-2E18	LoRa@401.7	1000mW	1132Km	22.77°	-137 dBm	-16 dB	7307 / 7044 Hz	682 / -818 Hz		70 Stations

Ilustración 88. Historial de todos los paquetes recibidos.

No siempre se ha recibido satélites con SNR negativa, aunque sea lo normal. Se adjunta aquí un ejemplo, Ilustración 89, en el que la señal era más fuerte que el ruido. En este caso era un satélite Norby que es uno de los que emiten con más potencia por lo que favorece una mejor recepción.

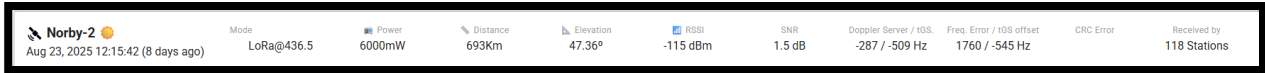


Ilustración 89. Paquete recibido con SNR positiva

Para analizar la telemetría recibida del mismo, tras clicar en la Ilustración 89, se nos despliega la telemetría recibida del satélite, así como un mapa en el que aparecen las estaciones que lo han recibido correctamente en verde y las que no en rojo. La telemetría concretamente de este paquete recibido proporciona el estado de las baterías, la temperatura a la que se encuentran ciertos componentes, así como información que no se puede deducir al ser privada sobre algún experimento que habrá llevado a cabo este satélite.

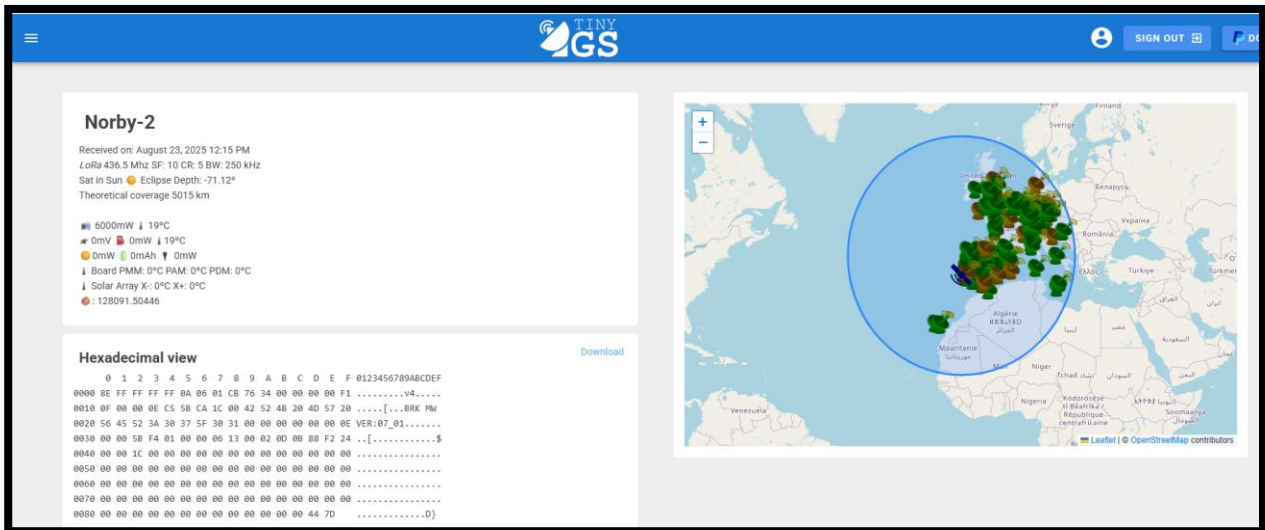


Ilustración 90. Vista informativa de un paquete recibido, concretamente de Norby-2

También es importante ver cómo las otras estaciones han recibido este paquete para poder ver cómo funciona nuestra estación con respecto a las demás. Ninguna estación será igual ya que depende de muchos factores siendo la antena y la ubicación de esta las dos más importantes, pero aun así se puede obtener una idea fijándonos en alguna que este cerca gracias al mapa. Por ejemplo, la estación EA7KFV, donde se ve que el satélite tuvo un pase mucho más lejano al encontrarse en Málaga y de ahí que tuviera una SNR algo peor o por ejemplo la estación EA7CH que está situada en Sevilla, pero lo recibió con error de CRC. Todo esto nos indica de forma aproximada que las prestaciones de nuestra estación son adecuadas para haberse construido de forma casera y funciona dentro de la normalidad requerida para recibir los satélites.

Station Name	Distance	Elevation	Time	RSSI	SNR	Doppler Server / IGS	Freq. Error / IGS offset	CRC Error
AMC_GS1	1145 Km	19.96°	19:42:43.432	-108.75 dBm	-11.75 dB	-2669 / -1792 Hz	1026 / 4007 Hz	
EA4JC_GS2	1551 Km	11.35°	19:42:43.436	-126.75 dBm	-11.75 dB	-3009 / -3038 Hz	560 / 4863 Hz	
EA7KFV	1659 Km	9.64°	19:42:43.441	-120 dBm	-5 dB	-5539 / -6111 Hz	-375 / 818 Hz	
EA1IRT	1241 Km	17.49°	19:42:43.246	-115 dBm	2.25 dB	-472 / -506 Hz	-10 / 1268 Hz	
MONVJ	1902 Km	6.34°	19:42:43.472	-129 dBm	-9 dB	6027 / 6960 Hz	1256 / 3278 Hz	

Ilustración 91. Otras estaciones que recibieron el mismo paquete visto en la captura 67. Parte 1.

Station Name	Distance	Elevation	Time	RSSI	SNR	Doppler Server / IGS	Freq. Error / IGS offset	CRC Error
X10Tracker	2105 Km	4.00°	19:42:43.341	-126.75 dBm	-16.75 dB	-2753 / -3085 Hz	-170 / 5201 Hz	●
EA7CH	1491 Km	12.36°	19:42:43.321	-128.5 dBm	-17.5 dB	-5637 / -4615 Hz	-19 / 3424 Hz	●

Ilustración 92. Otras estaciones que recibieron el mismo paquete visto en la captura 67. Parte 2.

Por ver más variabilidad de telemetría se adjunta en la Ilustración 93 la captura de otro satélite, concretamente del Polytech_Universe-4. Se observa las veces que se ha reiniciado, siendo este caso 2, que se actualizó hace unas 4 horas y que en el primer pase al sol estaba a 8 mA, en el segundo a 0 mA y en el tercero a 306 mA, entre otros datos de interés.

Polytech_Universe-4

Received on: August 30, 2025 11:05 AM
 LoRa 437.785 Mhz SF: 8 CR: 6 BW: 62.5 kHz
 Sat in Sun ☀ Eclipse Depth: -51.42°
 Theoretical coverage 4795 km

- 800mW
- Vbus 8412mV Ibus 202mA 1699mW
- 100% 8376mV 339mA Cell 4129mV
- 20°C min 11°C max 12°C
- 8mA
- 0mA
- 306mA

RSSI: -98dBm SNR:0dB 15044sec ago
 Uptime: 15039sec Reset: 2 times

Hexadecimal view Download

```

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 A B C D E F 0123456789ABCDEF
0000 00 02 7E C0 3E 40 8C 04 02 60 04 04 02 00 C4 3A .....7@.....
0010 00 9E FF 00 07 0E 09 01 BF 3A 00 00 DC 20 CA 00 .....
0020 02 40 07 00 08 00 00 00 32 01 00 14 08 0C 0C 06 .....2.....
0030 09 00 00 00 00 00 00 00 0F 48 AF 48 88 20 53 .....H.H. S
0040 01 21 10 64 .....1.d
                    
```

Ilustración 93. Paquete recibido del satélite Polytech_Universe-4

Es importante recalcar que la antena en todas las pruebas estuvo apuntando al Oeste, de ahí que toda la telemetría recibida pertenezca a satélites cuyos pases estaban por esa zona (Ilustración 86). También se puede observar que la antena estaba situada en una ventana (que no estaba colocada en una posición de cielo abierto óptimo) y aun así se consiguió recibir mucha telemetría y muchas veces con mejor SNR que otras estaciones bases cercanas, lo que deja claro que la antena está bien construida, así como las bondades de la tecnología LoRa.



Ilustración 94. Colocación de la antena

En la Ilustración 95, se muestra la distribución final de los componentes incluyendo la caja protectora y la placa solar. Resaltar que la placa solar posee una base con ventosa o con posibilidad de atornillarla que permite colocarla en un sitio óptimo cuando se vaya a mover la estación a su ubicación final.

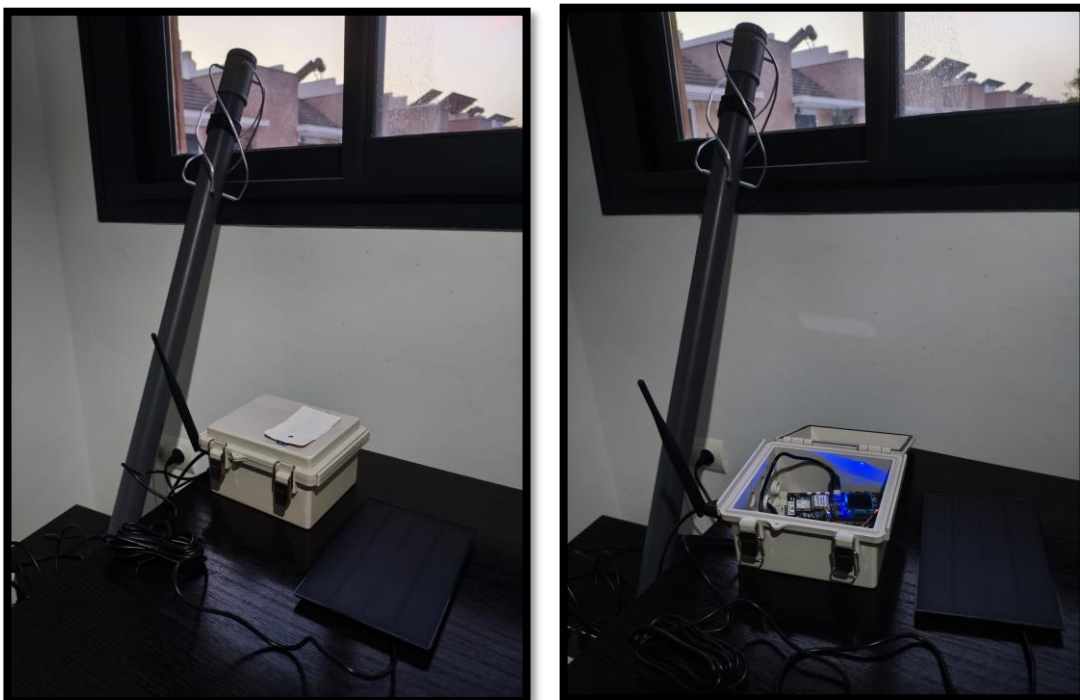


Ilustración 95. Distribución final de la estación base.

4.4 Precios de construcción de la estación terrena

En el título de esta memoria se indica que el diseño de la estación debe de ser de bajo coste, es por eso que se ha realizado de la manera más asequible posible y por ello se adjunta una tabla con el desglose de todos los materiales junto con sus correspondientes precios.

Material	Precio (€)
Tubo de aluminio de 6 mm diámetro	2.79
2x varillas de aluminio de 4mm de diámetro	3.89
Tubo de PVC 50 mm	3.10
Tapón PVC	0.97
Manguito	0.50
Cable coaxial RG58	20.90
Tornillos de 3.5 mm	2.43
Terminales de anillo	1.89
Limpiador PVC	4.30
Pegamento PVC	2.81
Crimpadora + conector SMA	22.69
Placa Esp 32 LoRa	51
TOTAL	107.49

Tabla 1. Materiales y costos

Resaltar que no se incluye en esa tabla la caja con protección ante lluvia ya que la ha proporcionado el departamento y no supone costo adicional.

Se puede declarar que la construcción de la estación base está dentro del ámbito de bajo coste al ser un total comprendido entre 51€ y 107.49 € dependiendo de si se decide construir la antena o usar la que trae la placa incorporada. Es necesario comentar que lo que más encarece es el modelo escogido de la placa ESP32, teniendo la posibilidad el usuario de elegir otro algo más económico y pudiendo variar el total a un valor más reducido.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El desarrollo inicial de la solución era simplemente usar una placa esp32 o similar y construirla con todos los elementos necesarios para darla de alta en TinyGs con el objetivo poder monitorizar los distintos satélites recibidos. Sin embargo, se le quiso dar un aspecto personalizado y que mejorase la recepción de señales y se decidió estudiar y construir una antena propia, por lo que a nivel personal y técnico la autora considera que ha servido tanto para recordar como para ampliar conocimientos sobre las ecuaciones de Maxwell, el análisis de parámetros S, la influencia de la geometría en la frecuencia de resonancia, a simular una antena en 4 nec2, etc. También ha servido de ayuda para poner en práctica otras habilidades como son la planificación, la investigación, así como el desarrollo de documentación técnica.

En lo que respecta a los objetivos del proyecto, tal y como se ha podido ir observando en los distintos capítulos, se puede concluir que se han cumplido ya que se tiene una estación base funcional con la solución TinyGs integrada y con un coste bastante económico.

En lo que respecta a líneas futuras, se puede ampliar horizontes implementando un filtro paso de banda justo antes del receptor con el fin de rechazar posibles interferencias. Además, como ya se ha comentado anteriormente, la antena QFH sacrifica los pases bajos por lo que habría que complementarla con otra vertical de gran ganancia para esos pases como puede ser la eggbeater.

REFERENCIAS

- [1] T. Pratt y J. E. Allnutt, *Satellite Communications*, John Wiley & Sons Ltd, 2020.
- [2] F. D. Quesada Pereira, «Comunicaciones Espaciales: Subsistemas del Satélite y entorno espacial,» 2010. [En línea]. Available: https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6091/mod_resource/content/1/tema3_2009.pdf.
- [3] S. Peredo Álvarez, «Satélites,» 2004. [En línea]. Available: https://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/peredo_a_s/capitulo2.pdf.
- [4] J. A. Pérez Carrasco, «Material de la asignatura Comunicaciones Via Satélite,» Universidad de Sevilla, 2025.
- [5] The European Space Agency, «Thermal Control,» [En línea]. Available: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Thermal_Control.
- [6] The Editors of Encyclopedia Britannica, «Klystron,» [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/technology/klystron>.
- [7] Keylink Microwave, «Solid-State Power Amplifier (SSPA) and Its Applications,» 2023. [En línea]. Available: https://www.keylinkmw.com/blog/solid-state-power-amplifier-sspa-and-its-applications_317/.
- [8] Chang Guang Satellite Technology, «Components of complete satellite ground systems,» [En línea]. Available: <https://www.jllglobal.com/components-of-complete-satellite-ground-systems.html>.
- [9] N. M. Kraetzig, «Ground Stations Explained: How Does Satellite Data Travel from Space to Earth?,» 2024. [En línea]. Available: <https://geoawesome.com/geo-hub/ground-stations-explained-how-does-satellite-data-travel-from-space-to-earth/>.
- [10] Gobierno de España, «Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias,» [En línea]. Available: <https://avance.digital.gob.es/espectro/Paginas/cnaf.aspx>.
- [11] International Telecommunication Union, «ITU Radio Regulations,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2024>.
- [12] Ministerios de Asuntos Económicos y Transformación Digital, «Orden ETD/1449/2021, de 16 de diciembre, por la que se aprueba el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias,» 2023. [En línea].

- Available: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2021/BOE-A-2021-21346-consolidado.pdf>.
- [13] M. J. Madero Ayora, «Material de la asignatura Sistemas Emergentes de Comunicaciones,» Universidad de Sevilla, 2024.
- [14] P. Baltuille, «LoRaWAN y su aportación a las tecnologías IIoT,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.incibe.es/incibe-cert/blog/lorawan-y-su-aportacion-las-tecnologias-iiot>.
- [15] G. Martin, «New Space: The Emerging Commercial Space Industry,» 2015. [En línea]. Available: https://www.earthdata.nasa.gov/s3fs-public/2023-11/newspace_nasa.pdf.
- [16] Semtech, «What is LoRa,» [En línea]. Available: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.
- [17] LoRa Alliance, «What is LoRaWAN,» [En línea]. Available: https://lora-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan/.
- [18] TinyGs, «TinyGs,» [En línea]. Available: <https://tinygs.com/>.
- [19] J. M. Galileo, «GitHub - tinyGS,» [En línea]. Available: <https://github.com/G4lile0/tinyGS>.
- [20] L. d. Valle, «Satélites LoRa con TinyGS,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=vxW2i9vy-O0>.
- [21] C. G. Manning, «What is an antenna?,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.nasa.gov/general/what-is-an-antenna/>.
- [22] L. d. Molino, «Antenas omnidireccionales para satélites,» 2025. [En línea]. Available: <https://radioaficion.biz/8-antenas-omnidireccionales-para-satelites/>.
- [23] J. Coppens, «Antena Cuadrifilar Helicoidal: Adaptación y conexión al cable,» [En línea]. Available: <https://jccoppens.com/ant/qfh/adapt.php>.
- [24] Base Aérea de Morón, «ANEXO I. Tutorial para la simulación de antenas con 4nec2,» [En línea]. Available: <https://www.qsl.net/4nec2/ANEXOS.pdf>.
- [25] C. F. Milazzo, «144 MHz Omnidirectional Horizontal Antennas - Part 1,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.qsl.net/kp4md/omnihoriz.htm>.
- [26] M. W. Maxwell, Reflections III Transmission Lines and Antennas, CQ Communications Inc., 2010.
- [27] J. Coppens, «Antena Cuadrifilar Helicoidal: Calculadora,» [En línea]. Available: <https://jccoppens.com/ant/qfh/calc.php>.
- [28] R. Hollander, «Resonant Quadrifilar Helix Antenna,» [En línea]. Available: http://www.emgo.cz/www_profi_137/pdf/rqhaeng.pdf.
- [29] A. Fernández, «Estación de Satélites con Antenas QFH,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.amsat-ea.org/app/download/10785740/ESTACI%25C3%2593N%2BDE%2BSAT%25C3%2589LITES%2BCON%2BANTENAS%2BQFH%2B-%2BEA4BFK.pdf>.

- [30] Carlos Volt, «NanoVna: Calibración, prueba de antena, actualización y corrección de firmware,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=dwnvYYW0gxo&t=226s>.
- [31] J. G. Carmenate, «ESP32 Wifi y Bluetooth en un solo chip,» [En línea]. Available: <https://programarfacil.com/esp8266/esp32/>.
- [32] J. M. Galileo, «Ground Station configuration,» 2024. [En línea]. Available: <https://github.com/G4lile0/tinyGS/wiki/Ground-Station-configuration>.
- [33] LilyGO, «GitHub - TTGO-T-Beam,» 2021. [En línea]. Available: <https://github.com/LilyGO/TTGO-T-Beam/tree/master>.
- [34] Espressif, «ESP32 Datasheet Version 5.1,» [En línea]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
- [35] Soldered, «Display OLED I2C 0.96" SSD1306,» [En línea]. Available: https://soldered.com/product/display-oled-i2c-white-0-96-ssd1306/?srsltid=AfmBOopouK0rKL_eEjODWra-IkPQEBM5CPOoUIDJkG5M9ngubnXnWs1T.
- [36] u-blox, «NEO-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet,» [En línea]. Available: [https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf).
- [37] Universidad Nacional Autónoma de México, «Estaciones Terrenas,» [En línea]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/162/A6.pdf?sequence=6>.
- [38] RFWirelessWorld, «Satellite Ground Station Basics,» [En línea]. Available: <https://www.rfwireless-world.com/articles/satellite-ground-station-basics>.
- [39] K. Sergieieva, «Tipos De Satélites: Sus Órbita Y Funciones,» 2025. [En línea]. Available: <https://eos.com/es/blog/tipos-de-satelites/>.
- [40] Celestia TTI, «Solid state power amplifier sspa buc,» [En línea]. Available: <https://celestia-tti.com/solid-state-power-amplifier-sspa-buc/>.
- [41] The European Space Agency, «Types of orbits,» [En línea]. Available: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits.
- [42] X-Powers, «AXP2101 Datasheet V1-4,» 2024. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/804899487/AXP2101-Datasheet-V1-4>.

ANEXO A. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENAS EN 4NEC2

En este apartado se procederá a explicar los pasos para simular la antena en 4nec2 que es una herramienta basada en nec2. Dicha herramienta se puede descargar de la web oficial, y se deberá deshabilitar el antivirus o añadir una excepción para poder descargarlo. Como curiosidad, NEC no es más que un código fuente que permite representar las propiedades electromagnéticas de las antenas basado en las ecuaciones integrales para corrientes inducidas, en el diseño de una antena para fuentes y campos complementarios.

Al iniciar la herramienta se abre una ventana principal que carga los últimos valores obtenidos en la última simulación (estarán a los valores por defecto si no se simuló nunca nada). Esta ventana “Main” recoge los datos generales de entrada y salida del archivo NEC2 como pueden ser corrientes y tensiones expresadas en su valor eficaz, la eficiencia del modelo de antena simulado, la eficacia de radiación (cuánta energía se disipa en forma de calor, de tal forma que a mayor número de eficacia menor es la pérdida de energía en calor y mejor es el modelo), la impedancia obtenida, el S.W.R, etc.

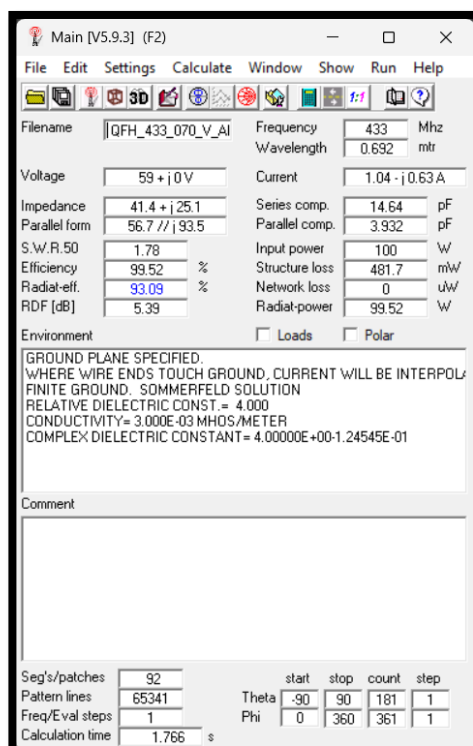


Ilustración 96. Menú Main de 4nec2

Tal y como se observa en la parte superior de la Ilustración 96, existe una barra de opciones donde cada una tienen una función y son:

- **File:** permite abrir ficheros de entrada (.nec) o salida (.out), guardar fichero de salida como, importar datos de campo lejano en distintos formatos e imprimir.

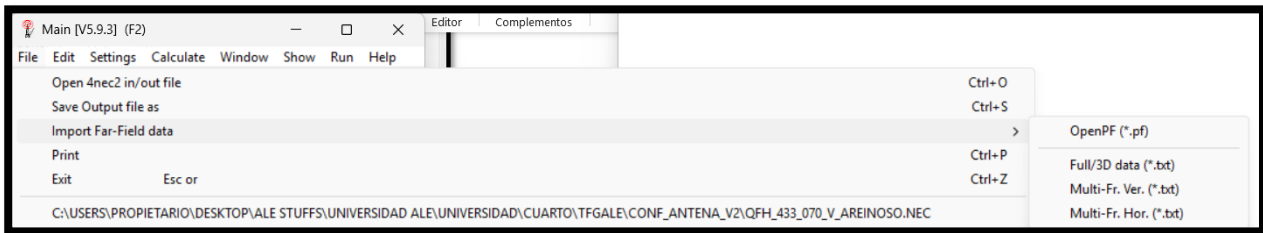


Ilustración 97. Opción File del Main de 4nec2

- **Edit:** permite editar los ficheros de entrada o salida. Para los ficheros de entrada usa el editor marcado en la opción Settings. Para el de salida usa WordPad.exe, de tal forma que habrá que instalarlo previamente si no se tiene o editarlo manualmente con cualquier otro editor.

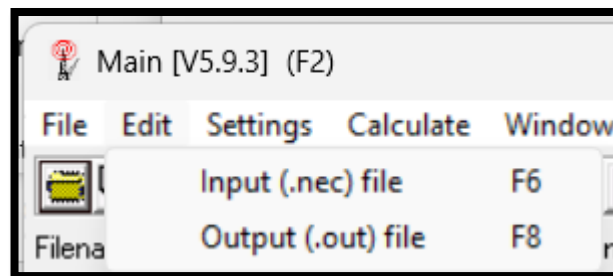


Ilustración 98. Opción Edit del Main de 4nec2

- **Settings:** esta opción permite configurar distintos aspectos de la herramienta como son el tipo de editor que se quiera usar, las unidades de azimut, longitud, radio, el uso de memoria, opciones del optimizador, entre muchas otras. No se entrará en detalles en todas sino solo en aquellas que se hayan ido usando para esta simulación. Resaltar que la herramienta hace una diferenciación entre el editor NEC y el nuevo editor NEC, ya que el nuevo introduce nuevos comandos como SY que hacen referencias a símbolos que son constantes donde almacenar valores. Hay que tener en cuenta que si se genera un fichero con el nuevo editor que contenga símbolos y se introduce en un programa distinto o en el 4nec2 pero usando el antiguo editor es probable que dé fallos principalmente porque no reconoce esos comandos.

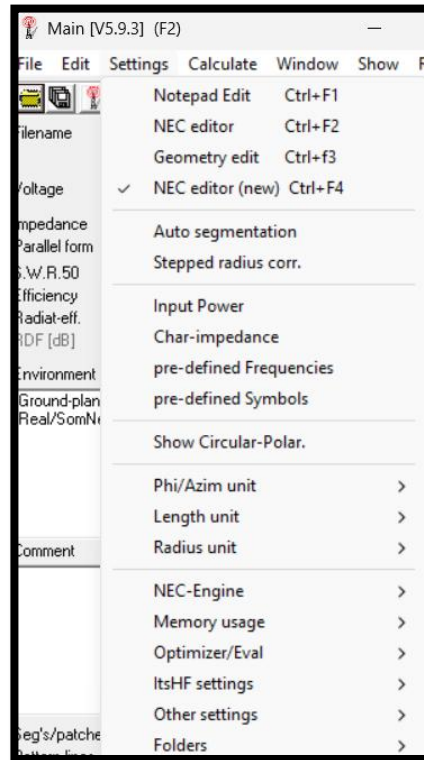


Ilustración 99. Opción Settings del Main de 4nec2

- **Calculate:** usada para calcular los valores de salidas a partir del fichero de entrada configurado o para iniciar el configurador del optimizador de parámetros.

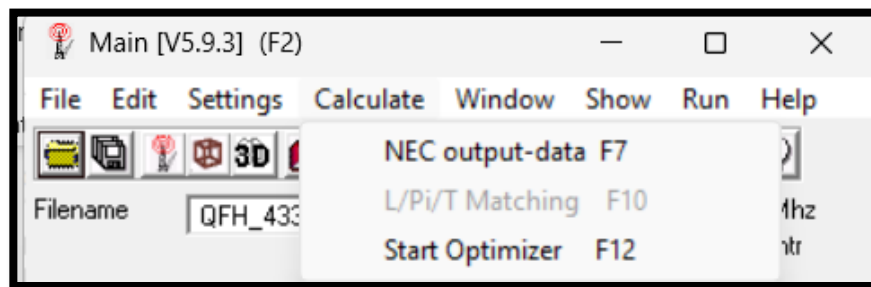


Ilustración 100. Opción Calculate del Main de 4nec2

- **Window:** se usa para poder abrir ventanas que se explican luego como Geometry, Pattern, 3D Viewer Line chart y Smirt chart.

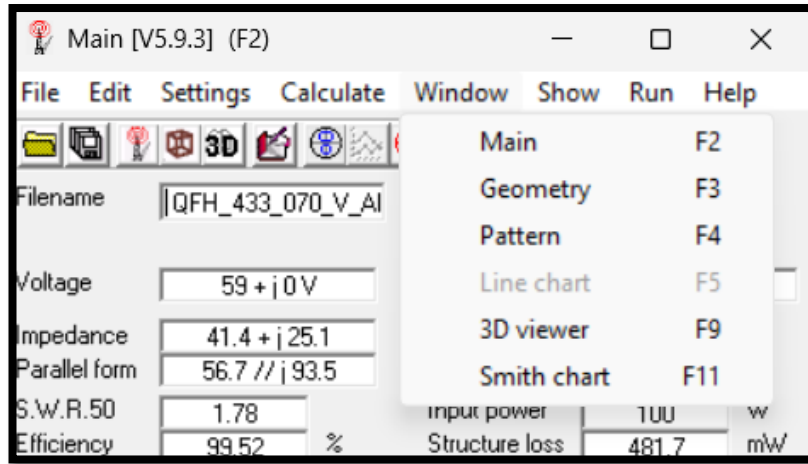


Ilustración 101. Opción Window del Main de 4nec2

- **Show:** sirve para mostrar los datos de excitación o carga usados en la simulación o para cambiar a polares los valores obtenidos en el fichero de salida.

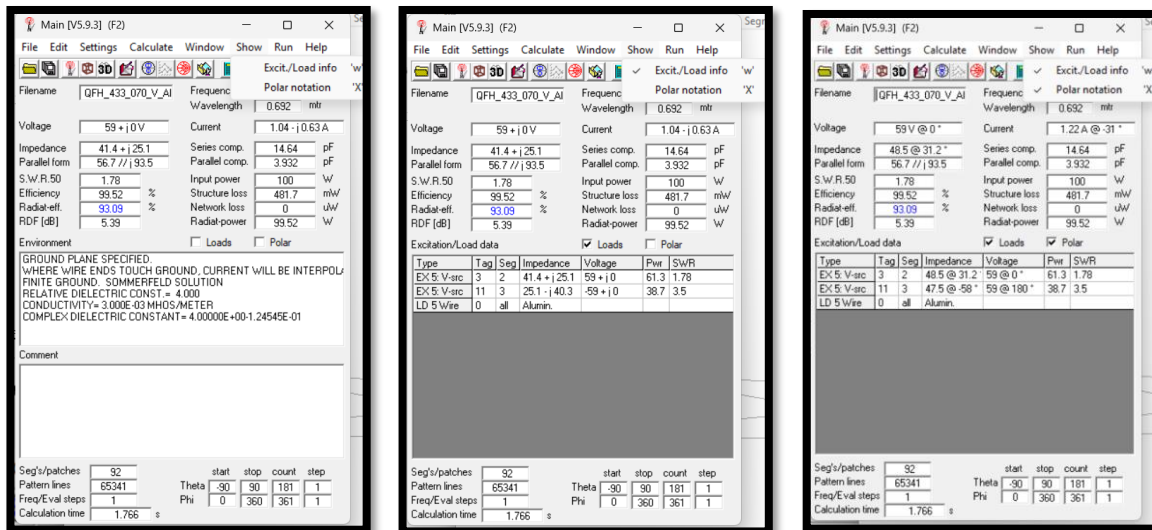


Ilustración 102. Opción Show del Main de 4nec2 con sus 2 posibilidades aplicadas

- **Run:** sirve para configurar y ejecutar otras vistas.

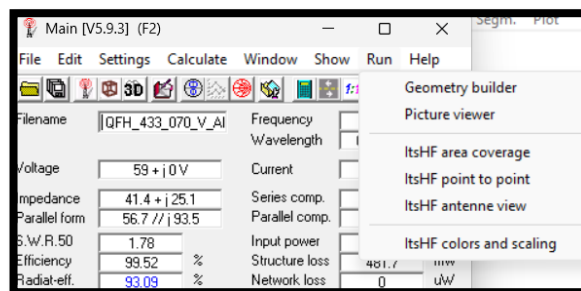


Ilustración 103. Opción Run del Main de 4nec2

- **Help:** opción que contiene manual de usuario sobre NEC, ayuda general, una pequeña guía en formato txt de pasos iniciales, verificación de la versión de DirectX, una opción para verificar actualizaciones y otra sobre la herramienta en sí.

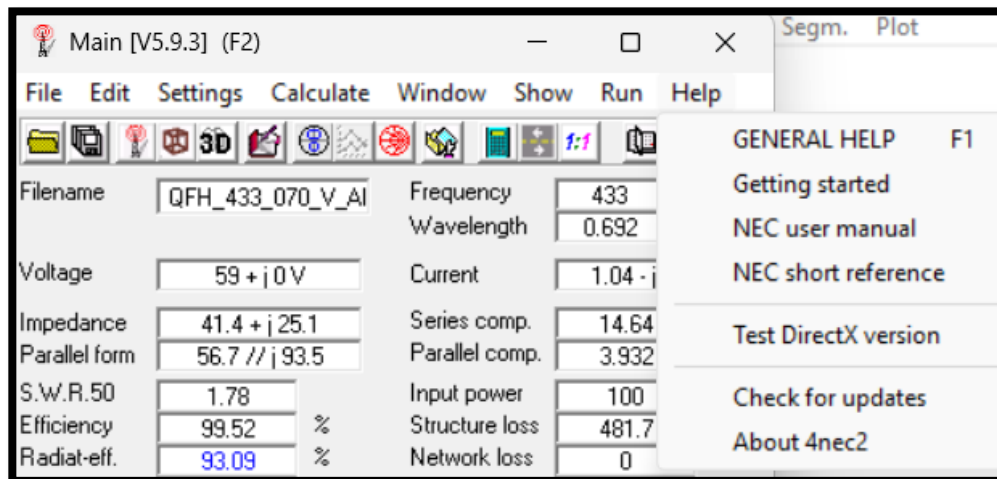


Ilustración 104. Opción Help del Main de 4nec2

Por otro lado, justo debajo de esas opciones hay una serie de iconos que sirven para ejecutar de forma más rápida las distintas opciones que ofrece la herramienta y que ya hemos comentado. A continuación, en la Ilustración 105, se explica de izquierda a derecha cada uno de esos iconos.

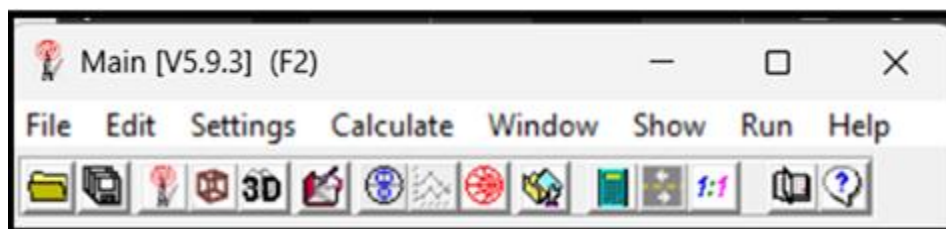


Ilustración 105. Iconos de la barra de herramientas

- La carpeta hace referencia a la opción de abrir un archivo nec.
- Los discos ofrecen la opción de guardar el archivo con un nombre y una ubicación proporcionados por el usuario.
- La torre de comunicación sirve para volver a la ventana principal (main).
- El cubo es el acceso directo hacia ventana geometry.
- Las siglas “3D” se refieren a la opción del visor 3D
- La libreta sirve para acceder al editor del archivo nec de entrada.
- La circunferencia con un patrón de radiación azul se usa para entrar en el diagrama de radiación del archivo nec de salida.
- Las gráficas que están sombreadas de gris es una opción que no se encuentra disponible.
- La circunferencia roja es el acceso a la carta de Smith.
- La segunda carpeta sirve para ver el archivo nec de salida

- La calculadora permite ejecutar según los parámetros que se indiquen el archivo nec de entrada.
- La carretera bidireccional es el acceso directo hacia el optimizador.
- El símbolo 1:1 hace referencia a la ventana red de acoplamiento
- El libro es un acceso al manual de uso de 4nec2
- El bocadillo con una interrogación en su interior hace referencia al soporte de ayuda.

Por otro lado, está la ventana Geometry, forma la estructura geométrica y donde se incluyen fuentes de voltaje, líneas de transmisión además de cargas. Lo que se observa en la Ilustración 116, es la antena helicoidal con las dimensiones establecidas y el patrón de radiación, pero no es posible ampliar la ventana para una mejor visión de esta.

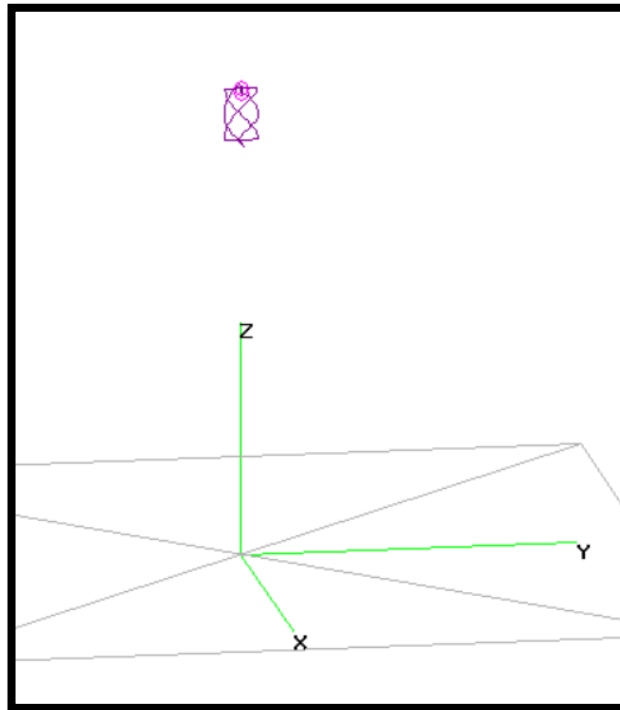


Ilustración 106. Vista de la ventana Geometry.

Como se aprecia en la ilustración 105, hay una serie de opciones (se van a obviar las que están sombreadas ya que no están disponibles) en la parte superior que son las siguientes:

- **Show:** contiene distintas opciones para mostrar u ocultar diferentes elementos de la geometría como pueden ser segmentos ('S'), los hilos ('N') así como alternar entre mostrar el resultado de campo cercano o lejano ('R') entre otras muchas cosas.

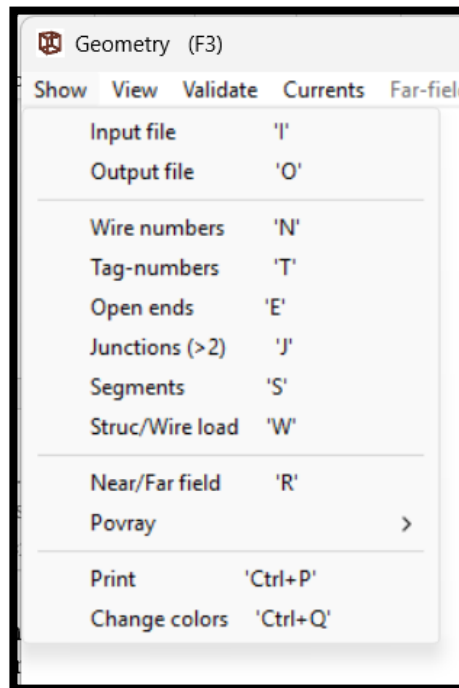


Ilustración 107. Opción Show del Geometry de 4nec2

- **View:** permite modificar la perspectiva de la vista con una serie de opciones como pueden ser zoom in o zoom out para acercar o alejar la vista, shift left, right, up, down para desplazar la vista del modelo hacia la izquierda, derecha, arriba, abajo fijando el mismo ángulo.

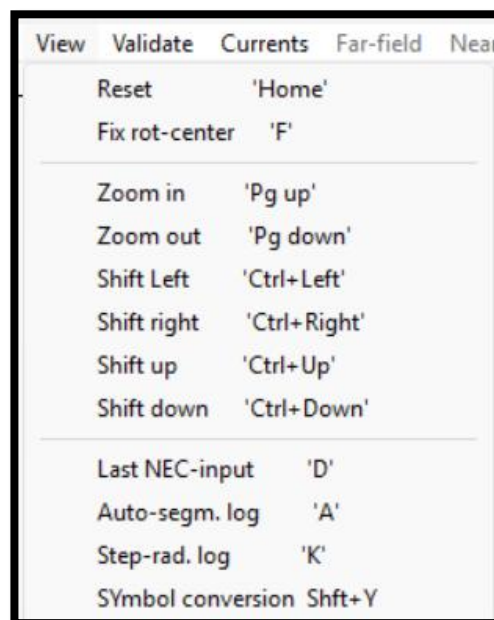


Ilustración 108. Opción View del Geometry de 4nec2

- **Validate:** analiza si existe algún posible fallo en la geometría, para ello hay opciones como Run geometry check que ejecuta una verificación completa de la geometría en busca de errores estructurales o una verificación más específica como puede ser run segment checks que comprueba los segmentos de forma individual.

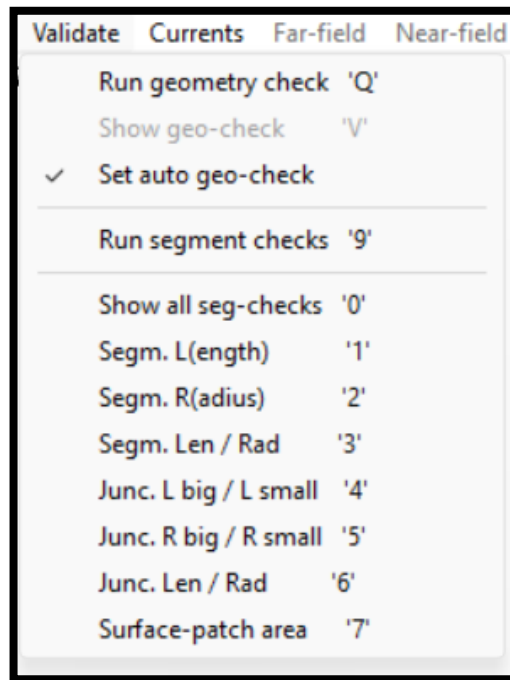


Ilustración 109. Opción Validate del Geometry de 4nec2

- **Currents:** permite visualizar las corrientes inducidas en los elementos de la antena tras la simulación con opciones como Current magnitude o Phase only que muestran la amplitud y la fase en cada segmento del modelo.

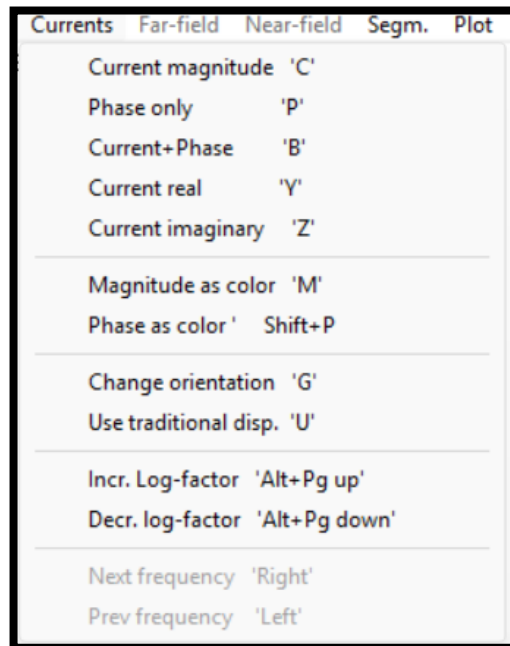


Ilustración 110. Opción Currents del Geometry de 4nec2

Si pulsamos la opción 'B' se observa una representación como la que se visualiza en la Ilustración 111

donde se aprecian las corrientes junto a su fase.

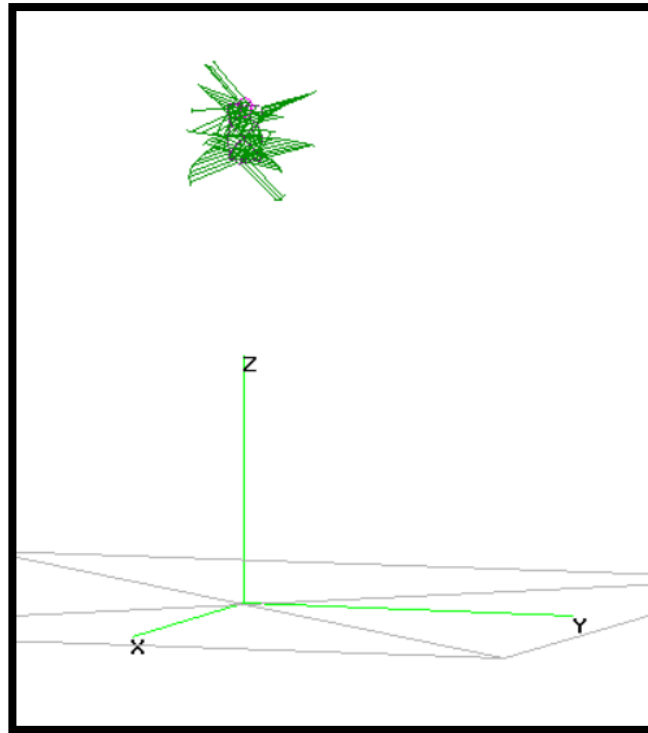


Ilustración 111. Opción B de Currents

- **Segm:** tiene como objetivo la identificación y navegación entre los segmentos del modelo con opciones como Identify W/S que según donde se coloque el cursor, muestra el cable o segmento asociado, o polar notation, que cambia los valores a notación polar en vez de cartesiana.

Segm.	Plot
Identify W/S	'?'
Identify Tag	'Shift+?'
Next	'Alt+Right'
Previous	'Alt+Left'
Set as Center	'Alt+Home'
Polar notation	'X'

Ilustración 112. Opción Segm del Geometry de 4nec2

- **Plot:** permite elegir el tipo de información a representar a través de opciones como magnitud que muestra la magnitud del parámetro que se está evaluando, phase que se corresponde a la fase y la parte real o imaginaria que sirve para visualizar la parte real e imaginaria respectivamente del parámetro.

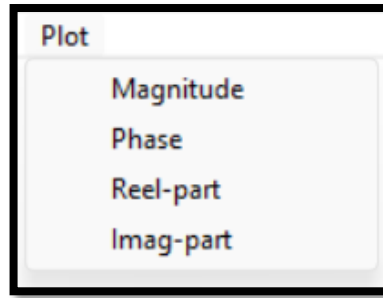


Ilustración 113. Opción Plot del Geometry de 4nec2

Finalmente, la ventana Pattern representa el comportamiento de campos lejanos y cercanos como se puede apreciar en la Ilustración 114.

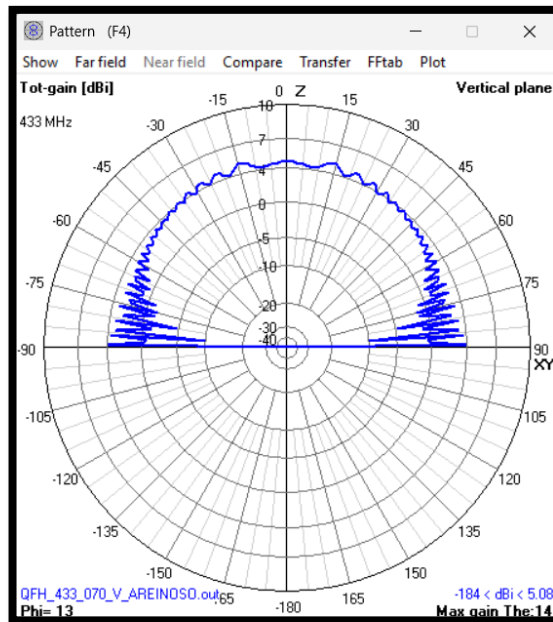


Ilustración 114. Ventana Pattern

A continuación, se va a detallar cada una de las opciones que conforman esta vista para su total comprensión.

- **Show:** permite mover al usuario por los distintos patrones de radiación que se hayan calculado a través de opciones como el siguiente patrón de la lista ('>') o el anterior ('<') o acceder a un patrón concreto ('J') escribiendo el número correspondiente al mismo o la frecuencia.

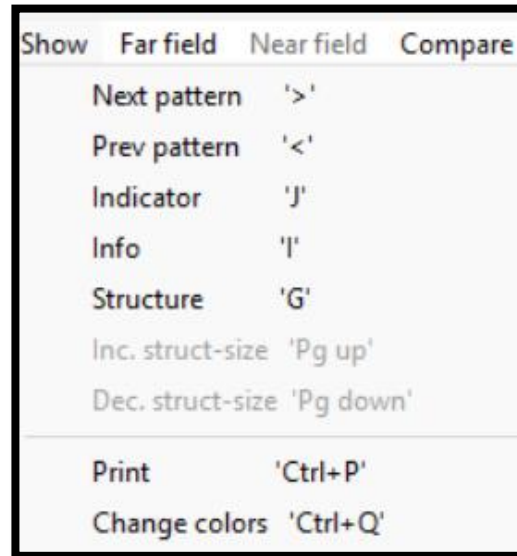


Ilustración 115. Opción Show de la ventana Pattern de 4nec2

- Far Field:** esta opción hace referencia a la región que se encuentra más lejos de la antena, donde la radiación electromagnética se comporta como ondas planas. Para ello existen múltiples opciones como son la de mostrar ambos patrones horizontal y vertical ('D'), mostrar líneas resaltadas ('B'), activar la escala American Radio Relay League (ARRL) o como mover el siguiente corte Phi/Az hacia la izquierda ('Left') entre otras.

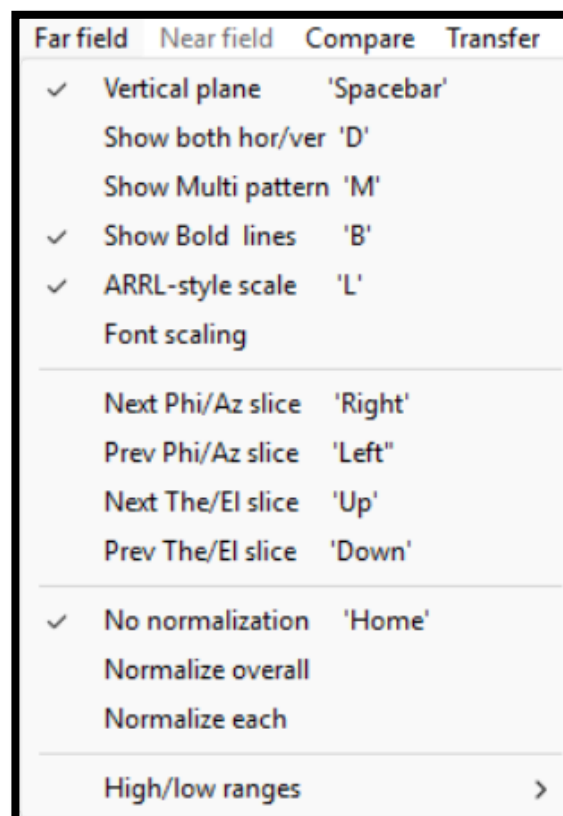


Ilustración 116. Opción Far field de la ventana Pattern de 4nec2

- **Compare:** sirve para comparar diferentes configuraciones de patrones de radiación dentro de un mismo proyecto con el fin de evaluar los efectos, durante este proyecto se ha utilizado esta opción y se puede apreciar en la imagen 117.

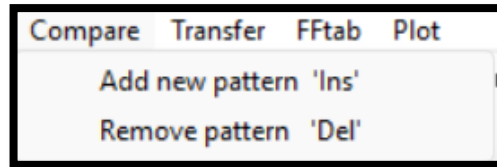


Ilustración 117. Opción Compare de la ventana Pattern de 4nec2

- **Transfer:** esta opción sirve para exportar resultados obtenidos del programa o para importar datos.

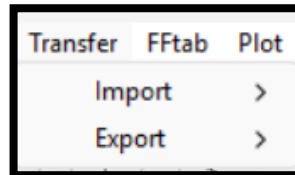


Ilustración 118. Opción Transfer de la ventana Pattern de 4nec2

- **FFtab:** es una vista relacionada con el análisis de la transformada rápida de Fourier, ésta se usa para analizar las componentes de frecuencia y ver su comportamiento en el dominio de la frecuencia.

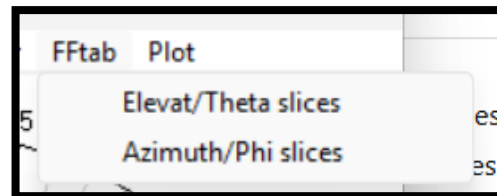


Ilustración 119. Opción Fftab de la ventana Pattern de 4nec2

- **Plot:** se usa para visualizar gráficamente los resultados, ya sea en 3D o en 2D como vemos en la ilustración 120.

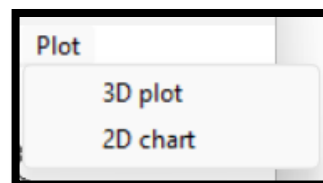


Ilustración 120. Opción Plot de la ventana Pattern de 4nec2

5.1 Estructura del NEC2 y simulación

Se va a explicar la estructura del NEC2 basándonos en el que se ha diseñado para la simulación de la antena QFH. Lo primero que se va a detallar son las tarjetas o “cards” de control de programa que no son más que líneas de comando que empiezan por un código de dos letras. Cada una de estas líneas controla la ejecución general del programa, es decir, cómo se comporta la simulación en aspectos como frecuencia, tipo de análisis, estructura de la antena, etc.

Las tarjetas se listan a continuación según su identificador mnemotécnico junto con su descripción:

- Grupo 1
 - EK – Indicador del uso del kernel extendido de hilo delgado.
 - FR – Especificación de frecuencia.
 - GN – Especificación de parámetros del suelo.
 - KH – Rango de aproximación de interacción.
 - LD – Carga de impedancia en la estructura.
- Grupo 2
 - EX – Tarjeta de excitación de la estructura.
 - NT – Especificación de red de dos puertos.
 - TL – Especificación de línea de transmisión.
- Grupo 3
 - CP – Cálculo de acoplamiento
 - EN – Indicador de fin de datos
 - GD – Especificaciones adicionales de parámetros del suelo.
 - NE – Solicitud de campo eléctrico cercano.
 - NH – Solicitud de campo magnético cercano.
 - NX – Indicador de siguiente estructura.
 - PQ – Control de impresión de densidad de carga en los hilos.
 - PT – Control de impresión de corriente en los hilos.
 - RP – Solicitud de diagrama de radiación.
 - WG – Escritura de archivo de Función de Green Numérica.
 - XQ – Tarjeta de ejecución.

Hay que recordar que el nuevo editor de 4nec2 permite introducir una nueva “card” SY que hace referencia a la introducción de símbolos o variables que permiten almacenar valores.

Ya conocida la nomenclatura se procederá a explicar cómo se ha desarrollado la simulación mostrando todos los pasos a seguir.

Lo primero que se hará será abrir el archivo .nec que se ha desarrollado para la antena QFH accediendo a la primera opción que aparece cuando abrimos el desplegable de File.

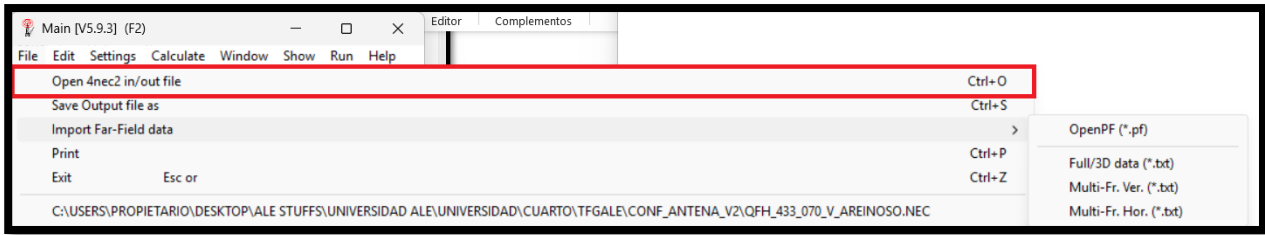


Ilustración 121. Paso 1 de la simulación en 4nec2

Ya con el archivo cargado procedemos a realizar la simulación accediendo previamente al editor que se encuentra en la barra de iconos de la ventana Main.

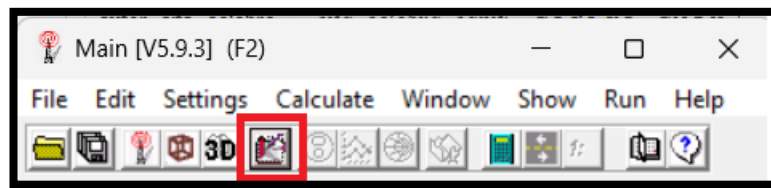


Ilustración 122. Paso 2 de la simulación en 4nec2

Tras pulsar en el icono correspondiente vemos la ventana del editor donde hay una serie de pestañas importantes a comentar. La primera de ellas es una vista de los símbolos definidos en el archivo cargado, pudiendo modificarlos desde el editor sin tener que volver a cargar el archivo. Es importante recalcar que hay un número limitado de símbolos a utilizar, concretamente 39, de forma que si el usuario sobrepasa el máximo saldrá un mensaje de error.

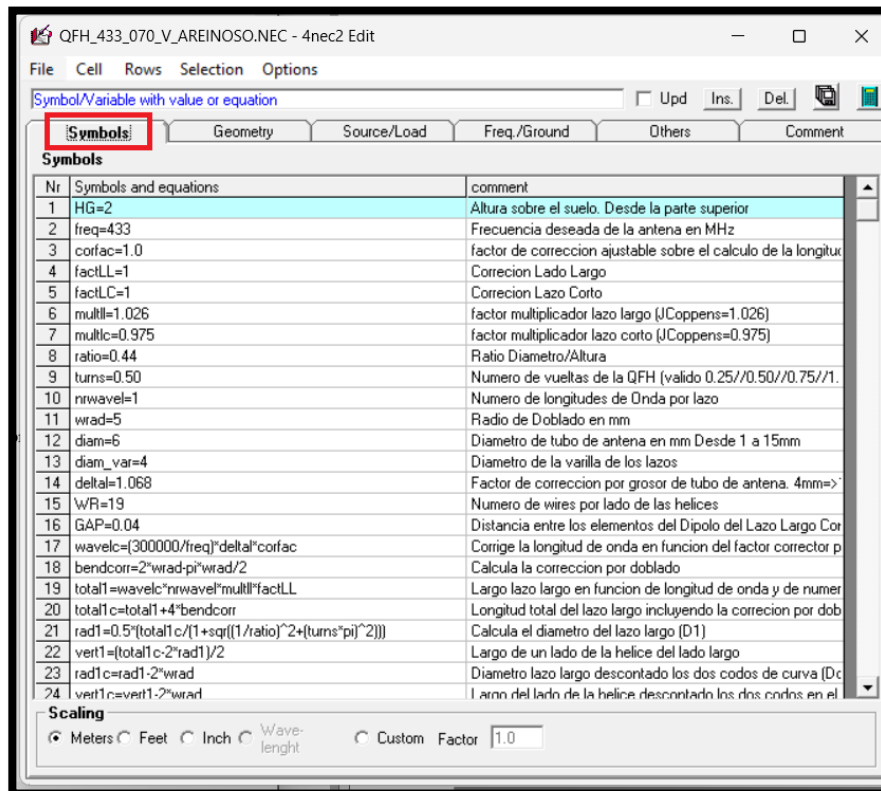


Ilustración 123. Opción Symbols del editor

La siguiente pestaña que destacar es la de Geometry, sirve para mostrar cómo se ha definido cada uno de los parámetros relacionados con la estructura física de la antena, así como para editar los mismos para obtener el resultado buscado.

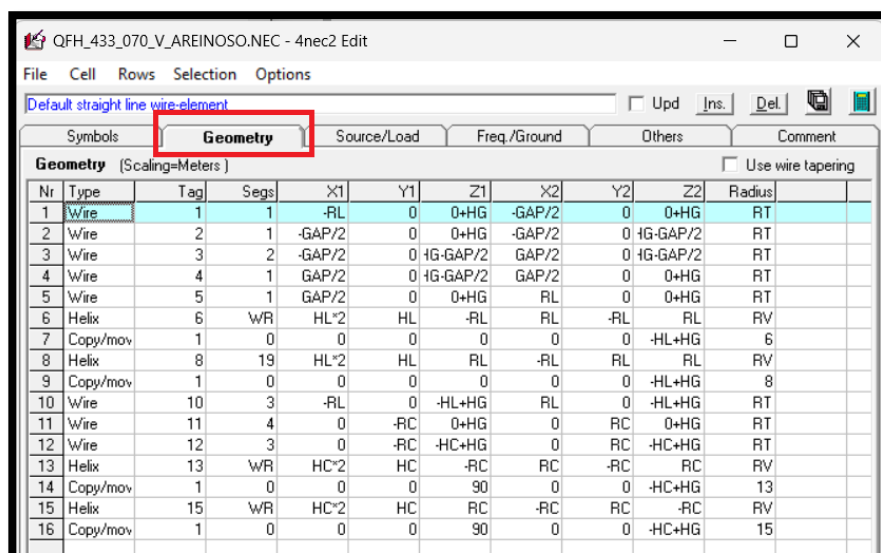


Ilustración 124. Opción Geometry del editor

Por último, la pestaña Freq/Ground es importante para la simulación ya que permite que el usuario escoja el tipo de suelo consiguiendo resultados más realistas. En las simulaciones realizadas se ha seleccionado siempre la opción de real ground del apartado de entorno o environment.

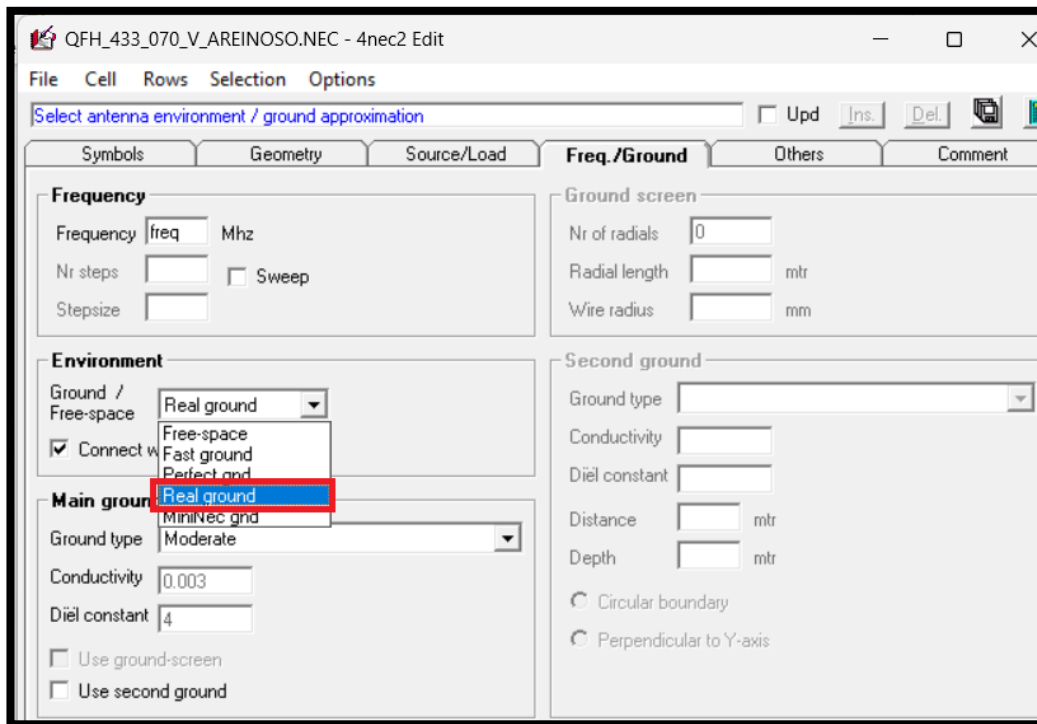


Ilustración 125. Paso 3. Opción Environment de Freq/Ground del editor

Además, dentro del apartado de suelo principal o main ground se ha diseñado en base un tipo de suelo moderado por ver los resultados en el peor caso que se pueda dar cuando la antena esté colocada en las instalaciones de la Escuela.

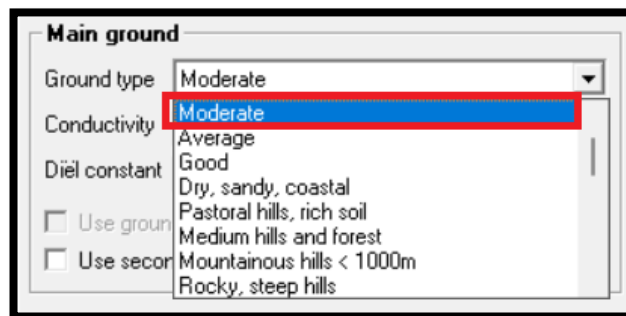


Ilustración 126. Paso 4. Estado del suelo

Tras confeccionar las secciones anteriores ya solo quedar definir el tipo de simulación que se pretende hacer para ello es necesario hacer uso del icono con forma de calculadora que aparece en el editor en la esquina superior derecha.

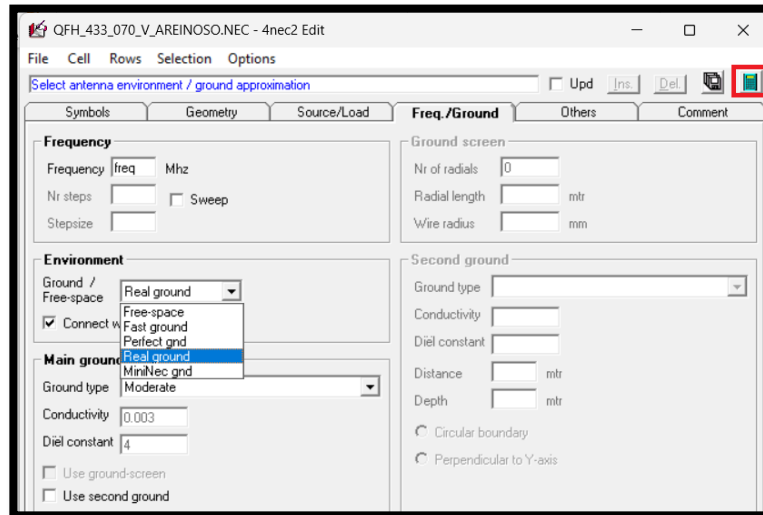


Ilustración 127. Paso 5. Calcular

Se va a realizar dos tipos de simulaciones distintas siendo la primera de ellas “Far field pattern” cuyo resultado será el patrón de radiación que tendrá la antena diseñada.

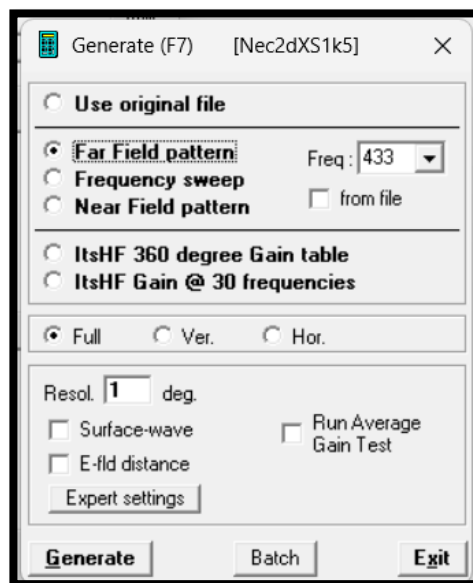


Ilustración 128. Simulación Far field pattern

Los resultados obtenidos tras pulsar el botón **Generate** son los siguientes, es importante recalcar que no se van a comentar debido a que ya se hizo el razonamiento necesario en el capítulo 4 de esta memoria.

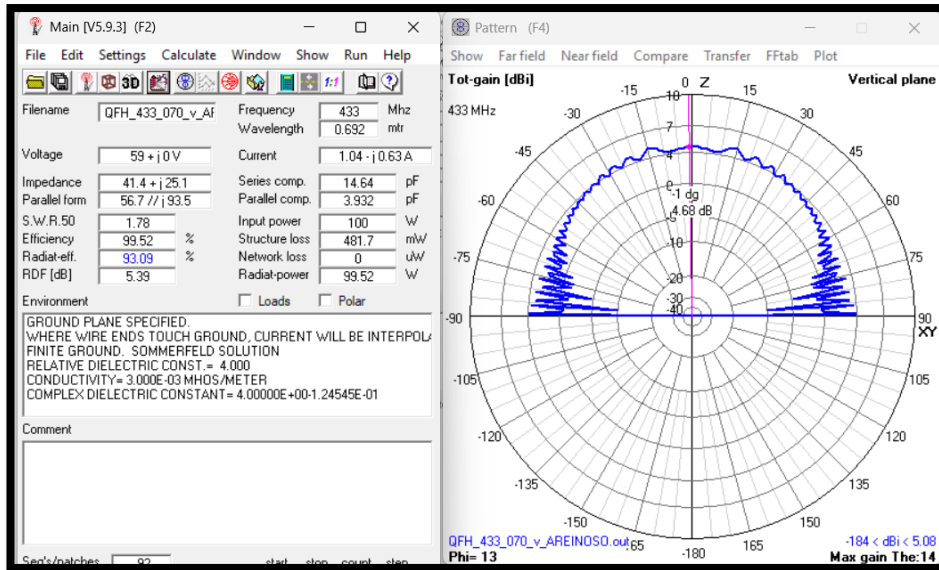


Ilustración 129. Resultados de la Simulación 1

Ahora que se ha hecho la simulación y el programa ha obtenido datos también es posible ver el diagrama en 3D accediendo al icono correspondiente que es el que se muestra en la Ilustración 130.

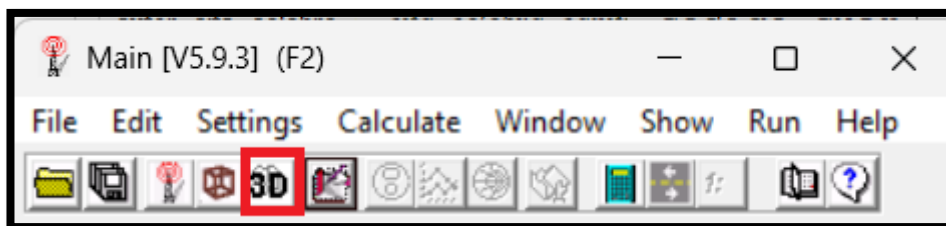


Ilustración 130. Icono Diagrama 3D

Dentro de la ventana que aparece se selecciona la opción de multicolor o la que el usuario prefiera (previamente estaba la opción por defecto que esconde el diagrama).

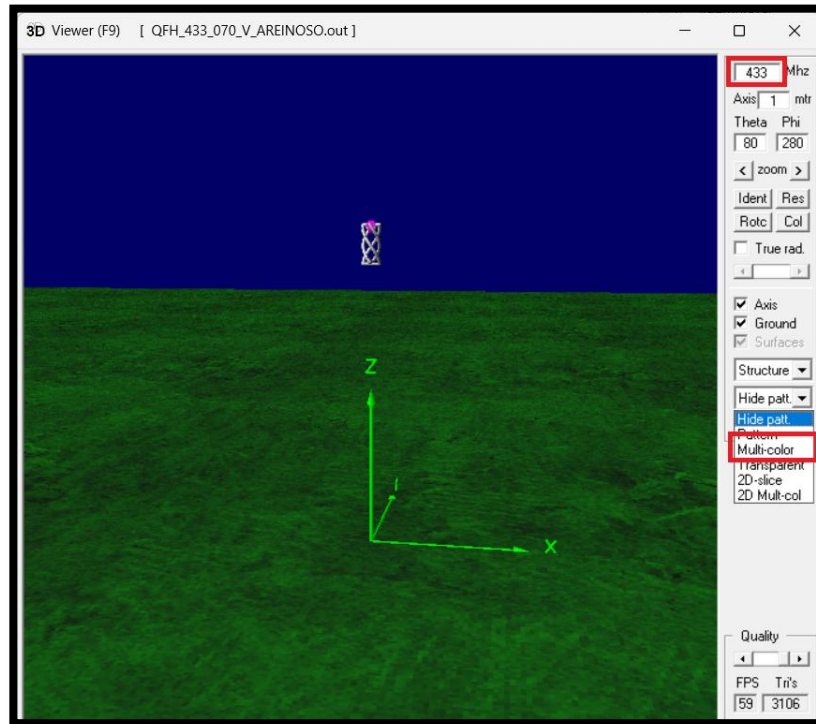


Ilustración 131. Pestaña 3D Viewer

Automáticamente tras clicar en la opción anterior descrita, saldrá el diagrama que hemos comentado con una escala de color que varía según la ganancia que radie en cada sentido. Es necesario aclarar que a diferencia de la Ilustración 131, para ésta se ha optado por esconder la estructura de la antena como se aprecia en las opciones.

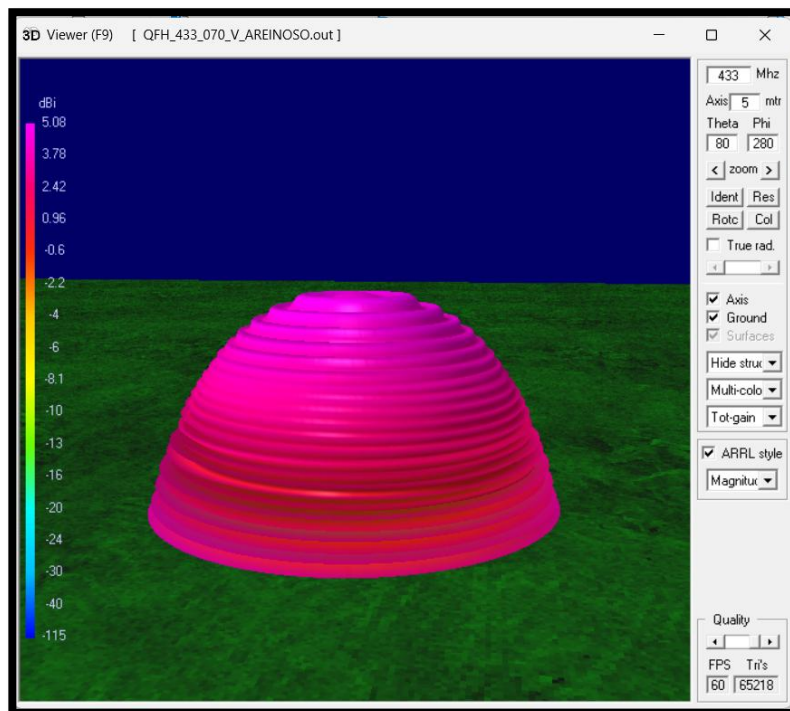


Ilustración 132. Resultado tras aplicar los filtros comentados

Si ahora se hace una segunda simulación, pero con la casilla de “Frequency sweep” se obtendrá un barrido en el

rango de frecuencias que se haya configurado, siendo el caso de este ejemplo entre 400 MHz y 500 MHz con un paso de 1.



Ilustración 133. Simulación Frequency sweep

Obteniendo los siguientes resultados:

1. El primero de ellos, *SWR/ref*, muestra dos gráficas, **la primera** (azul) de ellas nos dice la ROE que tendría la antena con los parámetros deseados. Si comparamos este resultado con el que se midió en la antena tras su construcción vemos que se obtuvo un resultado mejor incluso que en la simulación. La **segunda gráfica** (roja) nos indica cómo de adaptada está la antena. Se puede ver que para la frecuencia de 433 MHz se obtiene un valor de -11.062 dB. El coeficiente de reflexión (R_{loss}) viene definido por la siguiente ecuación:

$$R_{loss} = -20 \log_{10}(|\Gamma|) \quad (20)$$

siendo Γ el coeficiente de reflexión.

Si hacemos los cálculos para el valor que hemos obtenido a la frecuencia de trabajo nos sale un $\Gamma = 0.26$ es decir, un 26% de la amplitud de la onda se refleja, que es un **valor aceptable**.

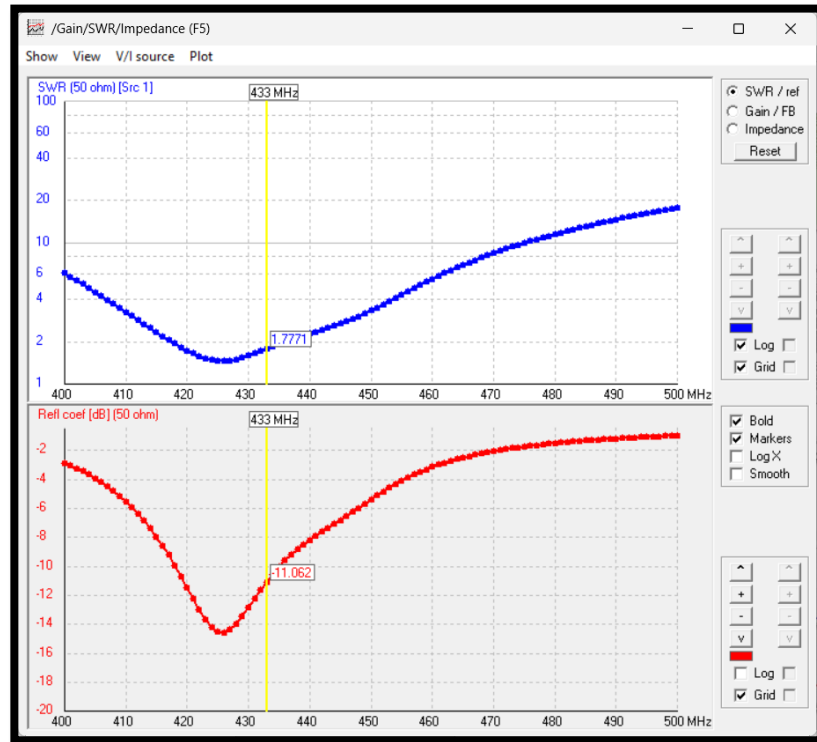


Ilustración 134. Resultados simulación 2. Opción SWR/ref

- Si ahora seleccionamos la opción de **Gain/FB**, vemos en la Ilustración 134 que la máxima ganancia, 5,08 dB, se obtiene a la frecuencia de trabajo (433 MHz) por lo que eso es un buen indicio de que los parámetros usados están correctamente elegidos para la frecuencia deseada. Por otro lado, la gráfica inferior muestra la relación front/back, este parámetro mide el grado de direccionalidad de una antena en el plano de máxima radiación. Se observa que para la frecuencia 433 MHz, la relación es de 0, que tiene sentido ya que eso indica que es omnidireccional porque radia la misma potencia en todas las direcciones y se puede verificar de la siguiente manera:

$$F/B(dB) = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P_{front}}{P_{back}}\right) \quad (21)$$

siendo P_{front} y P_{back} la potencia que radia de frente y de atrás respectivamente. Si ambas son iguales nos quedaría:

$$F/B(dB) = 10 \cdot \log_{10}(1) = 0 \quad (22)$$

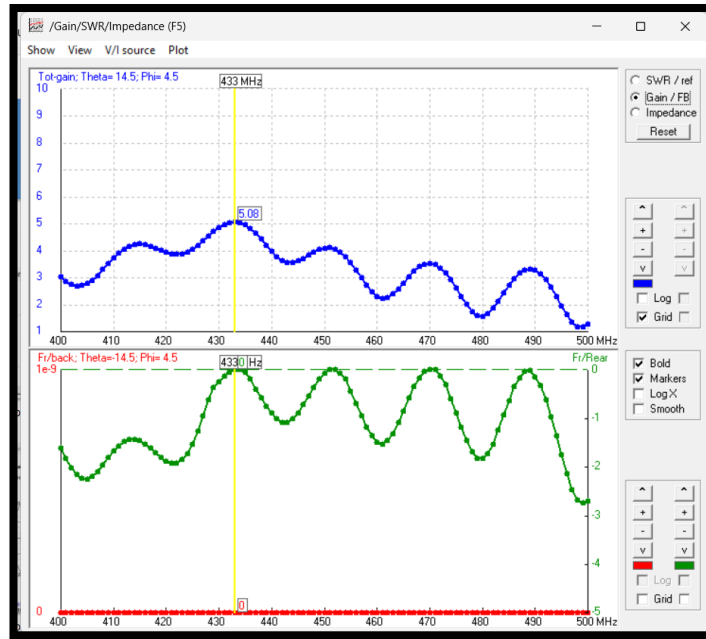


Ilustración 135. Resultados simulación 2. Opción Gain/FB

- El tercer resultado se obtiene tras pulsar la opción de **Impedance**, la gráfica de arriba muestra que, para la frecuencia de 433 MHz, la línea azul que hace referencia a la resistencia toma un valor de 41.43 Ω . Por otro lado, la línea roja hace referencia a la reactancia, cuyo valor es de 25.11 Ω . Al ser ese valor positivo nos indica que la antena tiene un componente inductivo. Además, en la gráfica inferior se observa que se está calculando el módulo de la impedancia como raíz cuadrada de la resistencia al cuadrado más la reactancia al cuadrado, dando un valor de 48.45 Ω , que es acorde debido a su cercanía a los 50 Ω .

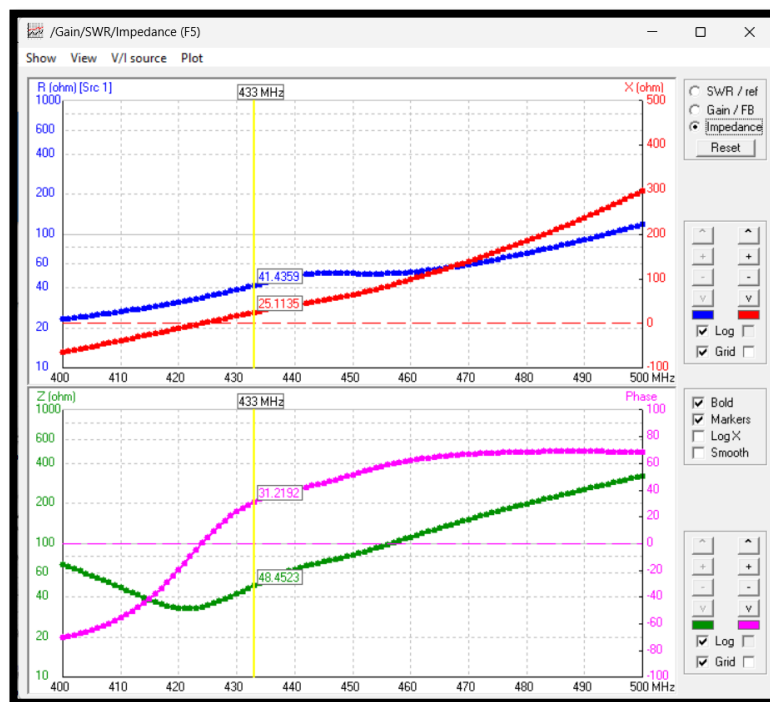


Ilustración 136. Resultados simulación 2. Opción Impedance

ANEXO B. DETALLES DEL NANOVNA

En este capítulo se describirán los pasos a seguir para calibrar un NanoVNA, pero primero quiero agradecer a Pedro, EA7E, por prestar su analizador y poder hacer así las pruebas necesarias.

NanoVNA es un analizador de red vectorial cuya utilidad es medir ciertos parámetros de RF en antenas, cables y filtros entre otros componentes. El menú por el que se navegará es el de la Ilustración 137:

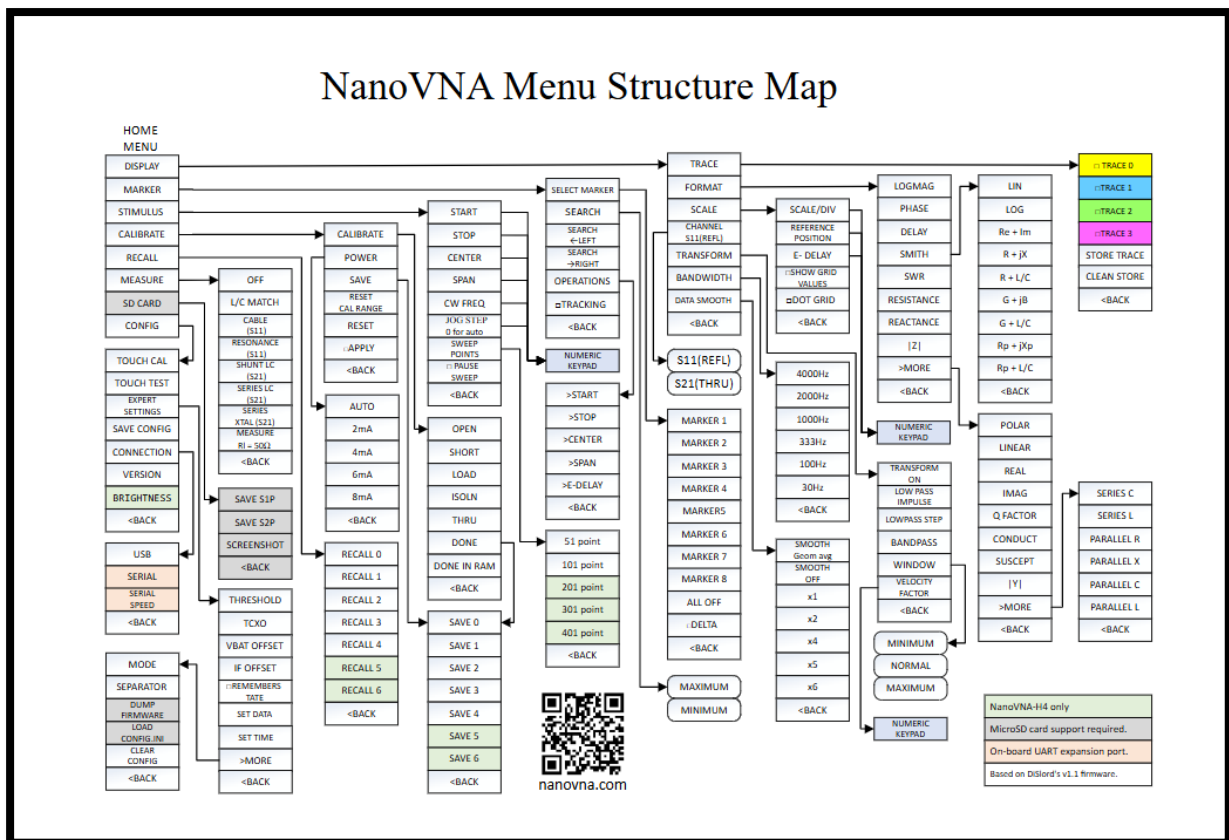


Ilustración 137. Mapa estructural del Menú de la NanoVNA

Antes de empezar a realizarse la calibración es necesario indicar el rango de frecuencias en que se va a trabajar, para ello se seleccionará la opción de estímulos como se aprecia en la Ilustración 138.

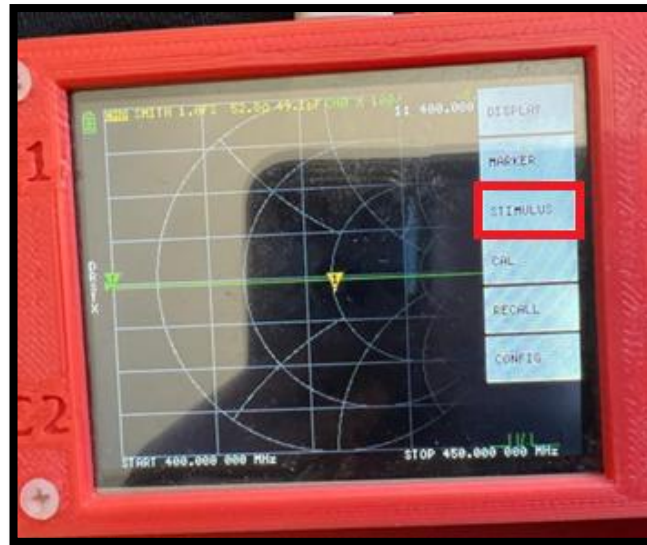


Ilustración 138. Home Menú de la NanoVNA

Posteriormente se marcará los límites inferiores y superiores del rango anteriormente comentado haciendo uso del botón de start y stop. A aclarar que las letras que aparecen en el teclado del analizador, G, M, K hacen referencia a gigahercios, megahercios y kilohercios respectivamente.

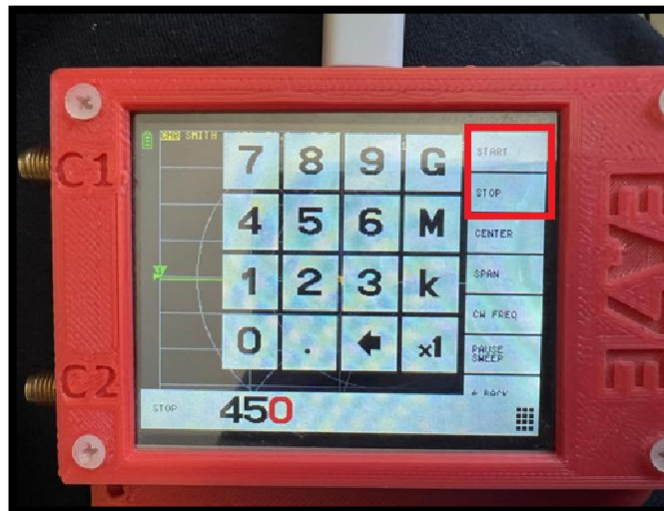


Ilustración 139. Como introducir un rango de frecuencias en la NanoVNA

El siguiente paso es hacer uso de las distintas terminaciones que trae la nanoVNA que sirven para simular los diferentes tipos de redes. Una red abierta o haciendo su analogía en inglés, open (O) simula un circuito abierto. Por otro lado, el tapón cuya letra es S del inglés short, que es totalmente metálico simulando un cortocircuito y el último simula una carga de 50Ω .



Ilustración 140. Kit de calibración

Para empezar el proceso de calibración, es necesario dirigirse al menú principal de nuevo y seleccionar la opción CAL como vemos a continuación en la Ilustración 141.

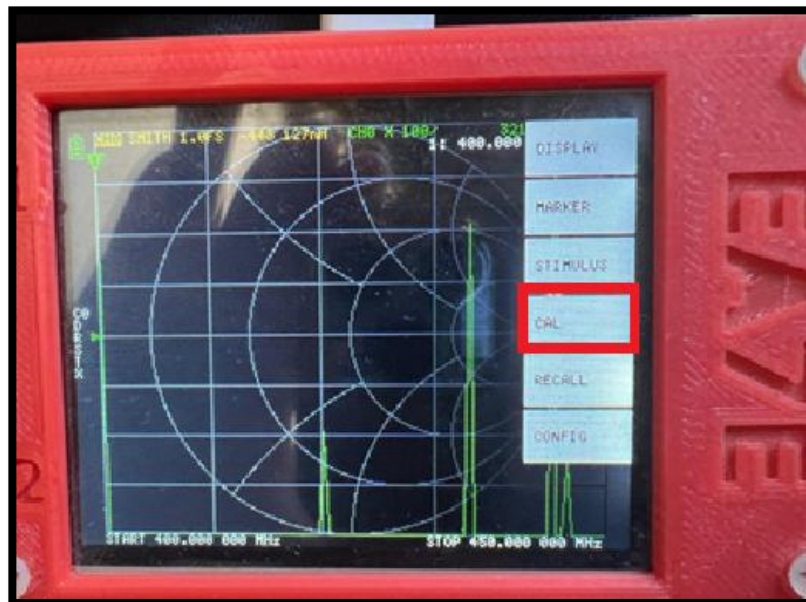


Ilustración 141. Desde el Home Menú selección de la opción CAL

Después se procederá a pulsar la opción de RESET para borrar cualquier posible configuración previa que se haya podido quedar en memoria y se seleccionará la opción CALIBRATE.



Ilustración 142. Opción calibrar de la NanoVNA

Si solamente se va a realizar medidas en el S11, como es el caso que corresponde a esta memoria, sólo será necesario configurar los tres primeros parámetros del menú desplegable. En el caso que se hicieran medidas S21 habrá que configurar todas las opciones, que es lo que se va a explicar a continuación con el fin de mostrar cómo se haría el proceso completo.

Lo primero que se hace es colocar la terminación correspondiente a la letra O en el canal 1 (C1) y pulsar la tecla open para que se quede esa medida guardada. Posteriormente, se usa la terminación con la inicial S en el canal C1 y de nuevo se pulsará la opción que se esté calibrando en ese momento, que es SHORT en este caso. Después, se conecta la carga adaptada (L) en el canal C1 y se pulsa LOAD. Se puede observar que cuando se ha calibrado cada una de las opciones, éstas se quedan marcadas con un fondo negro. La siguiente etapa es la correspondiente al aislamiento (ISOLN), que en este contexto mide el acoplamiento residual entre los canales 1 y 2, es decir, el grado en que se logra aislamiento. Para ello, la terminación correspondiente a la carga (L) se coloca ahora en el canal 2 y se pulsará en la opción anteriormente comentada como se aprecia en la imagen 143.

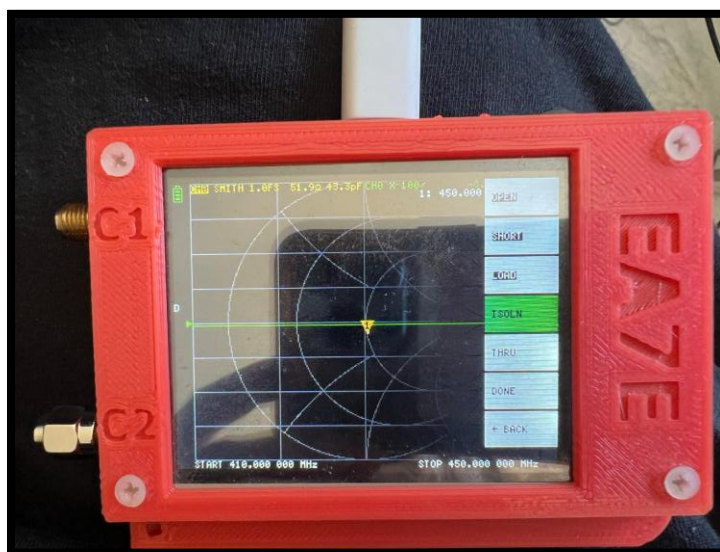


Ilustración 143. Etapa ISOLN de la calibración

El siguiente y último parámetro es el THRU que mide las pérdidas del cable, para ello es necesario conectar un cable entre ambos canales como se hizo a continuación y pulsar la tecla DONE para finalizar la calibración.

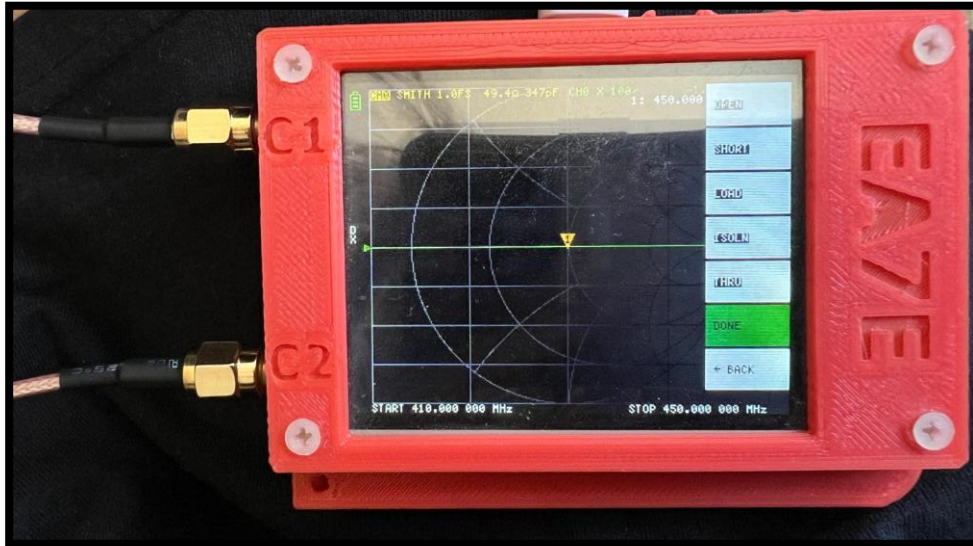


Ilustración 144. Etapa THRU de la calibración.

Una vez hecha la calibración hay una forma de comprobar que está correcta y es haciendo unas comprobaciones con el diagrama de Smith. Esto es una herramienta muy importante en RF y se usa para hacer medidas de un puerto con el fin de poder observar los coeficientes de reflexión. Representa la impedancia de carga (Z_L) en relación con la impedancia de la fuente (Z_0).

En los ejes de coordenadas cartesianas, la impedancia compleja se conforma a través de una parte resistiva y una parte reactiva presentando un problema de limitación debido a los rangos infinitos de ambas partes. Es por ello por lo que la carta de Smith soluciona este inconveniente doblando la mitad derecha del plano de coordenadas cartesianas, acercando los ejes de reactancia positiva y negativa de tal forma que encaja con el eje de la resistencia. De esta forma llegamos a la carta circular dónde la mitad superior es la región inductiva, la mitad inferior es la zona capacitiva y la separación entre ambas viene dada por un eje puramente resistivo como vemos en la Ilustración 145.

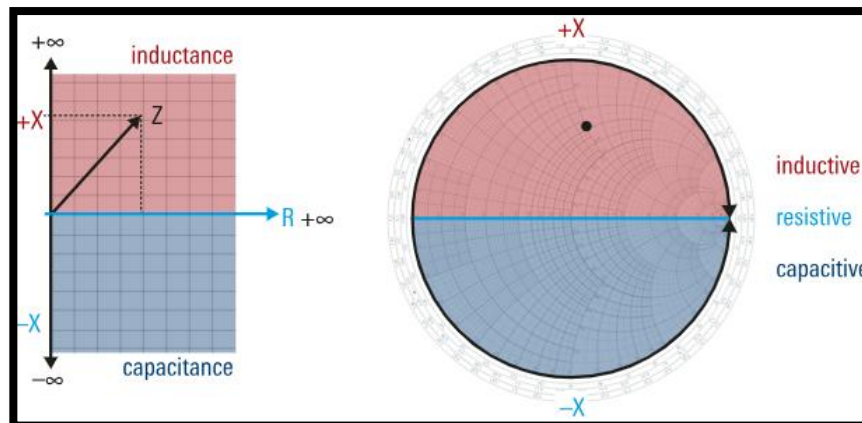


Ilustración 145. Coordenadas cartesianas en el diagrama de Smith.

En relación con las comprobaciones de la calibración, si colocamos la terminación correspondiente al circuito

abierto, es correcto que en la Carta de Smith aparezca el cursor al lado derecho, esto es debido a que un circuito abierto posee resistencia infinita que se corresponde con el extremo derecho tal y como se observa en la Ilustración 146.



Ilustración 146. Comprobación circuito abierto

Si ahora se coloca el circuito cerrado, se observa en la Ilustración 147 que el cursor se desplaza hacia la izquierda ya que la resistencia en este caso tiene un valor de 0.



Ilustración 147. Comprobación circuito cerrado.

En casi todos los sistemas de RF, la carga puramente resistiva (Z_0), es de 50Ω . Debido a esto, el diagrama de Smith normaliza en base a este valor la impedancia de la fuente a 1, es decir, el centro de la carta representa un valor de 50Ω y es justo lo que se está obteniendo al conectar el tapón que representa una carga de ese mismo valor, por lo que se puede dar por válida la calibración.



Ilustración 148. Comprobación carga adaptada de 50 Ω .