



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

**Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no
Renovables**

Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones

**Diseño e implementación de un sistema de comunicación móvil de
emergencia para solventar la falta de conectividad utilizando un
Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV)**

Trabajo de Integración
Curricular previo a la obtención
del título de Ingeniero en
Telecomunicaciones.

AUTOR:

Vicente Xavier Arias González

DIRECTOR:

Ing. Renato Benjamín Torres Carrión, Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2024

Certificación

Loja, 02 de agosto de 2024

Ing. Renato Benjamín Torres Carrión, Mg. Sc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Diseño e implementación de un sistema de comunicación móvil de emergencia para solventar la falta de conectividad utilizando un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV)**, previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones, de la autoría del estudiante **Vicente Xavier Arias González**, con cédula de identidad Nro. **1105372443**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Ing. Renato Benjamín Torres Carrión, Mg. Sc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Autoría

Yo, **Vicente Xavier Arias González**, declaro ser autor del presente Trabajo de Integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Integración Curricular, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual



Firma:

Cedula: 1105372443

Fecha: 02/08/2024

Correo electrónico: vicente.arias@unl.edu.ec

Teléfono: 0939559935

Carta de autorización por parte del autor, para la consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo del Trabajo de Integración Curricular.

Yo, **Vicente Xavier Arias González**, declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Diseño e implementación de un sistema de comunicación móvil de emergencia para solventar la falta de conectividad utilizando un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV)**, como requisito para optar el título de Ingeniero en Telecomunicaciones, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Integración Curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los dos días del mes de agosto del dos mil veinticuatro.

Firma:



Cedula: 1105372443

Fecha: 02/08/2024

Correo electrónico: vicente.arias@unl.edu.ec

Teléfono: 0939559935

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Renato Benjamín Torres Carrión, Mg. Sc

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mis queridos padres Eduardo y Mélida, cuyo amor y apoyo incondicional ha sido mi motor en cada paso de mi vida. Su sacrificio y confianza me impulsaron a edificar este logro. A mi hermano Luis, que ha sido fundamental en mi desarrollo personal y académico. A mis profesores, quienes con sus conocimientos y experiencias me han dado pautas sobre lo que será mi vida profesional. A mis amigos de toda la vida y a mis amigos que esta hermosa carrera me dejó, por su constante apoyo y por celebrar conmigo cada desafío cumplido. Y a Yoselin, por su amor y comprensión, que me ha llenado de motivación para nunca rendirme.

Vicente Xavier Arias González

Agradecimiento

Agradezco a Dios por sus favores infinitos para conmigo y mi familia. A mis queridos padres por siempre estar para mí y darme todo el apoyo durante esta etapa universitaria. Agradezco a la Universidad Nacional de Loja, por permitirme ser parte de esta respetada institución, especialmente a la poderosa carrera de Telecomunicaciones, donde con alegría compartí y adquirí conocimientos técnicos de sus grandes maestros.

Quiero agradecer de manera especial a mi director de tesis, el Ingeniero Renato Torres, quien desde un inicio me prestó su ayuda desinteresada, solventando cada duda e inquietud sobre este trabajo.

En definitiva, agradezco a todas las personas que han formado parte de mi vida tanto personal como académicamente.

Vicente Xavier Arias González

Índice de contenido

Certificación	i
Autoría	ii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento	v
Índice de contenido	vi
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras.....	xi
Índice de anexos	xiv
1. Título	1
2. Resumen.....	2
Abstract	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	7
4.1. Estado de arte	7
4.2. Antecedentes históricos.....	9
4.2.1. Terremoto del 2016 en Ecuador.....	10
4.3. Sistema de Comunicación de Emergencia	11
4.3.1. Perspectiva general	12
4.3.2. Retos asociados con las telecomunicaciones de emergencia.....	12
4.3.3. La ITU en la reducción y gestión de riesgos.....	13
4.4. UAVs y su uso en emergencias.....	13
4.4.1. UAVs y sus tipos	13
4.4.2. UAVs como infraestructura de comunicación para emergencias	16
4.5. Redes Inalámbricas	17
4.5.1. WPAN (Wireless Personal Area Network).....	17
4.5.2. WLAN (Wireless Lan Area Network).....	18

4.5.3.	WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)	18
4.5.4.	WWAN (Wireless Wide Area Network)	18
4.6.	Red de telefonía móvil	19
4.6.1.	Funcionamiento	19
4.6.2.	Modos de transmisión	22
4.6.3.	Tipos de tecnologías de redes móviles	22
4.7.	Long Term Evolution (LTE / LTE-A)	25
4.7.1.	Arquitectura	26
4.7.2.	Arquitectura de protocolos	29
4.7.3.	Bandas de frecuencia	31
4.7.4.	Modulación	32
4.7.5.	Trama	34
4.8.	Backhaul de red	36
4.9.	Radio definido por software (SDR)	36
4.9.1.	Arquitectura	36
4.10.	Marco legal	37
4.10.1.	Legislación sobre telecomunicaciones de emergencia	37
4.10.2.	Regulación de UAVs en el espacio aéreo ecuatoriano	38
4.10.3.	Políticas públicas que fomentan la innovación en emergencias	38
5.	Metodología	39
5.1.	Fases del proyecto	39
5.2.	Diseño del sistema	41
5.2.1.	Arquitectura	41
5.2.2.	Modelo de UAV	42
5.2.3.	Diseño de red 4G LTE	50
5.3.	Implementación del sistema	57
5.3.1.	Construcción del UAV	57

5.3.2.	Diagrama de conexiones electrónicas	63
5.3.3.	Configuración del UAV	64
5.3.4.	Implementación de la red 4G LTE.....	67
5.4.	Metodología de pruebas de rendimiento	80
6.	Resultados.....	82
6.1.	Pruebas de funcionamiento del UAV.....	82
6.1.1.	Operatividad.....	82
6.1.2.	Autonomía.....	83
6.1.3.	Respuesta de los sistemas	84
6.2.	Pruebas a la estación móvil LTE.....	84
6.2.1.	Rendimiento de red LTE.....	85
6.2.2.	Potencia de recepción y cobertura	86
6.2.3.	Test de velocidad Mbps	88
6.2.4.	Análisis de espectro de frecuencia.....	89
6.3.	Pruebas al prototipo completo UAV_eNB.....	91
6.3.1.	Funcionalidad.....	92
6.3.2.	Operatividad.....	93
6.3.3.	Autonomía.....	94
6.3.4.	Eficiencia del prototipo.....	96
6.3.5.	Cobertura del prototipo	97
6.3.6.	Calidad del prototipo.....	98
6.4.	Análisis de consumo eléctrico de nodo LTE.....	98
6.4.1.	Consumo Raspberry Pi 4	98
6.4.2.	Consumo de SDR Blade RF	98
6.4.3.	Consumo total por hora.....	99
6.4.4.	Autonomía con la Power Bank de 20000 mAh	99
6.5.	Análisis de seguridad del nodo LTE montado con srsRAN 4G.....	100

6.6. Análisis de costos	103
7. Discusión	105
8. Conclusiones	108
9. Recomendaciones	110
10. Bibliografía	112
11. Anexos	117

Índice de tablas

Tabla 1. Especificaciones y componentes sugeridos - frame tarot 650 sport	42
Tabla 2. Especificaciones del motor	43
Tabla 3. Especificaciones de las hélices	44
Tabla 4. Características del ESC de 40 A	45
Tabla 5. Especificaciones de batería LiPo	46
Tabla 6. Especificaciones del Controlador de Vuelo, placa de potencia y GPS.....	47
Tabla 7. Especificaciones de transmisor y receptor	49
Tabla 8. Características de portátil.....	51
Tabla 9. Características RPi 4B	51
Tabla 10. Características del SDR BladeRF 2.0 micro xA9.....	52
Tabla 11. Características de tarjetas SIM.....	53
Tabla 12. Características del programador de tarjetas SIM	53
Tabla 13. Características de las antenas.....	54
Tabla 14. Características del Samsung Galaxy S22+	55
Tabla 15. Mediciones de recepción de señal – Cobertura.....	87
Tabla 16. Resumen de los consumos energéticos	99
Tabla 17. Detalle de costos del hardware utilizado para implementación.....	103

Índice de figuras

Figura 1	Número de catástrofes naturales a nivel mundial de 2010 a 2022	10
Figura 2	Estado del servicio a 48 horas luego del terremoto.....	11
Figura 3	Tipos de UAV	14
Figura 4	Distribución de los rotores en un UAV	15
Figura 5	UAVs en red heterogénea.....	16
Figura 6	Clasificación de las redes inalámbricas y sus tecnologías	17
Figura 7	Tipos de celda en función del área de cobertura	19
Figura 8	Principio de sectorización de redes celulares	20
Figura 9	(a) Un clúster de 7 células, (b) Detalle de un plan de rehuso de frecuencias.....	21
Figura 10	Patrón de reuso y relación D/R.....	22
Figura 11	Evolución de los estándares de redes móviles.....	23
Figura 12	Arquitectura LTE	26
Figura 13	Elementos de la red EPS	27
Figura 14	Protocolos de Plano de Datos o Usuario E-UTRAN.....	30
Figura 15	Protocolos de Plano de Control.....	30
Figura 16	Portadoras OFDMA y SC-FDMA.....	33
Figura 17	Capacidades según modulación.....	33
Figura 18	Estructura de trama tipo 1	34
Figura 19	Diagrama del Resource Block y Resource Element.....	35
Figura 20	Estructura de trama tipo 2	35
Figura 21	Diagrama de bloques funcionales genérico de un dispositivo SDR.....	37
Figura 22	Diagrama de flujo empleado para la implementación del prototipo	40
Figura 23	Arquitectura de prototipo	41
Figura 24	Frame Tarot 650 Sport	42
Figura 25	Motor 4008, 330KV, 6S	43
Figura 26	Hélices de 15” plegables	44
Figura 27	ESC de 40 A	45
Figura 28	Batería LiPo de 8000mAh 6S.....	46
Figura 29	Controlador de vuelo, GPS, Placa de potencia y Grupo de cables.....	47
Figura 30	Emisora y receptor.....	49
Figura 31	Predator triton 300.....	50
Figura 32	Raspberry Pi 4 model B / 8GB RAM.....	51

Figura 33 BladeRF 2.0 micro xA9.....	52
Figura 34 Tarjetas SIM sysmoISIM-SJA2	52
Figura 35 CardMan 3121 USB CCID interface.....	53
Figura 36 Antenas Techtoo – Antenas “5G” de banda ancha.....	54
Figura 37 Samsung Galaxy S22+	55
Figura 38 Suite de Software srsRAN 4G - Arquitectura	57
Figura 39 Estructura del UAV – Frame tarot 650 sport	58
Figura 40 Montaje base central y brazos de los rotores.....	58
Figura 41 Montaje tren de aterrizaje en base central inferior	59
Figura 42 Montaje de base para la batería	59
Figura 43 Unión de las partes ensambladas.....	60
Figura 44 Montaje de motores	60
Figura 45 Montaje de los motores completada.....	61
Figura 46 Montaje de los ESC completa	61
Figura 47 Montaje de placa de potencia y conexión de los ESC.....	62
Figura 48 Montaje Pixhawk 6C, GPS, receptor y debidas conexiones	62
Figura 49 Montaje de UAV completo	63
Figura 50 Diagrama de conexiones electrónicas	64
Figura 51 Mission Planner 1.3.82.....	65
Figura 52 Mission Planner 1.3.82.....	65
Figura 53 Configuraciones obligatorias – Mission Planner.....	66
Figura 54 UAV listo para “Armar”.....	66
Figura 55 Se comprueba que se ha leído la SIM	75
Figura 56 Creación del APN en Equipo de Usuario (UE).....	75
Figura 57 Conexión a red WiFi	76
Figura 58 Prototipo completo – Sistema de comunicación de emergencia	80
Figura 59 Modos de vuelo del UAV.....	83
Figura 60 UAV en funcionamiento	84
Figura 61 Pruebas de rendimiento – Navegación por internet – Contenidos en vivo	85
Figura 62 Tasas del DL consumidas por dos UEs	85
Figura 63 Llamada de WhatsApp	86
Figura 64 Nivel de recepción a 14 m y 24 m del eNB.....	87
Figura 65 Test de velocidad.....	88
Figura 66 Test de velocidad.....	89

Figura 67 Esquema real de conexión para medición	89
Figura 68 Frecuencia de DL, canal listo para transmitir.....	90
Figura 69 Frecuencia de DL, canal ocupado – máxima capacidad	90
Figura 70 Frecuencia de UL, canal listo	91
Figura 71 Frecuencia de UL, canal ocupado – transmitiendo hacia la red del eNB.....	91
Figura 72 Funcionalidad del prototipo.....	92
Figura 73 Operatividad del prototipo.....	93
Figura 74 Operatividad del prototipo.....	95
Figura 75 Operatividad del prototipo.....	95
Figura 76 Cobertura del prototipo	97
Figura 77 Mapa de cobertura – Zona de conectividad habilitada.....	98
Figura 78 Consumo eléctrico real.....	100
Figura 79 Diagrama de seguridad LTE.....	102

Índice de anexos

Anexo 1. Bandas LTE.....	117
Anexo 2. Guía de configuración del UAV en Mission Planner	120
Anexo 3. Archivo de configuración epc.conf.....	128
Anexo 3. Archivo de configuración enb.conf.....	130
Anexo 5. Mapas de cobertura por la aplicación G-NetView Pro	139
Anexo 6. Certificado de traducción del resumen.....	142

1. Título

Diseño e implementación de un sistema de comunicación móvil de emergencia para solventar la falta de conectividad utilizando un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV)

2. Resumen

Las comunicaciones móviles de emergencia, son fundamentales para la eficiente gestión de riesgos, la falta de infraestructuras de telecomunicaciones para un despliegue rápido, amplifica la catástrofe. Por tal motivo, el presente trabajo explora la relevancia de implementar un sistema de comunicación móvil de emergencia empleando un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV). Este sistema ofrece una solución innovadora y eficaz para garantizar la conectividad en áreas remotas, durante desastres naturales o en situaciones de emergencia donde la infraestructura de comunicación tradicional se encuentre comprometida. En primera instancia, se realizó un análisis de componentes de hardware y software, el cual facilitó la selección de los más adecuados. El prototipo implementado consta de dos subsistemas, por un lado, el UAV y por otro, la red móvil 4G LTE. De este modo, se ensamblaron los componentes del UAV y se procedió a la configuración del controlador de vuelo en Mission Planner. Para la implementación del nodo LTE, se usó Ubuntu server 22.04 LTS en una Raspberry Pi 4, se instaló el software abierto srsRAN_4G, que permitió todas las configuraciones de la red central (EPC) LTE, además, se usó el BladeRF para actuar como eNB en la interfaz de acceso radio con 3 MHz de ancho de banda. Para la conexión de los UEs se usaron SIM/USIM programables. Esta estación LTE, se montó sobre el UAV y se realizaron pruebas de conectividad y rendimiento de la red desde el aire, llegando a una altitud de 30 metros, se midió la potencia de recepción en los UEs, capacidad de transferencia, cobertura, operatividad del UAV y su autonomía de vuelo. El prototipo resultó robusto, la red LTE funcionó acorde a sus configuraciones y se proporcionó conectividad a los UEs comerciales.

Palabras Clave: LTE, Ubuntu, UAV, Raspberry Pi 4, BladeRF, srsRAN

Abstract

Mobile emergency communications are fundamental for efficient risk management, the lack of telecommunications infrastructure for rapid deployment amplifies the catastrophe. For this reason, the present work explores the relevance of implementing a mobile emergency communication system using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). This system offers an innovative and effective solution to ensure connectivity in remote areas, during natural disasters or in emergency situations where the traditional communication infrastructure is compromised. In the first instance, an analysis of hardware and software components was realized, which facilitated the selection of the most suitable ones. The implemented prototype consists of two subsystems, on the one hand, the UAV and on the other hand, the 4G LTE mobile network. Thus, the UAV components were assembled, and the flight controller configuration was performed in Mission Planner. For the LTE node implementation, Ubuntu server 22.04 LTS was used on a Raspberry Pi 4, and the open software srsRAN_4G was installed, which allowed all the LTE core network (EPC) configurations, in addition, BladeRF was used to act as eNB on the radio access interface with 3 MHz bandwidth. For the UEs connection, programmable SIM/USIMs were used. This LTE station was mounted on the UAV and connectivity and network performance tests were performed from the air, reaching an altitude of 30 meters, the reception power in the UEs, transfer capacity, coverage, operability of the UAV and its flight autonomy were measured. The prototype was robust, the LTE network worked according to its configurations and connectivity was provided to the commercial UEs.

Keywords: LTE, Ubuntu, UAV, Raspberry Pi 4, BladeRF, srsRAN

3. Introducción

Al estar ubicado en una región altamente sísmica y propensa a varias catástrofes naturales, Ecuador se enfrenta a grandes desafíos en materia de gestión de emergencias y comunicaciones. En los últimos años se ha registrado un aumento en la frecuencia e intensidad de catástrofes naturales a nivel mundial. De acuerdo con el informe "El costo humano de los desastres - Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR)" en el período de 20 años comprendido entre 2000 y 2019, la base de datos de situaciones de emergencia (EM-DAT) del Centro de Investigaciones sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED) "registró 7,348 desastres, que se cobraron un total de aproximadamente 1.2 millones de vidas y afectaron a más de 4,030 millones de personas" (2020, p. 9).

En el contexto específico de Ecuador, al formar parte de la Cuenca del Pacífico eleva la exposición a riesgos naturales, como terremotos, erupciones volcánicas, inundaciones y deslizamientos de tierra (Bernabé Miguel Angel et al., 2015, p. 90), eventos que atentan contra la seguridad de sus habitantes y que pueden interrumpir gravemente las comunicaciones y la conectividad en las áreas afectadas dificultando las labores de rescate y respuesta ante emergencias.

La pérdida total o parcial de la conectividad en situaciones de emergencia es una problemática crítica que agrava aún más la magnitud de un desastre natural, la gestión de riesgos se ve más afectada al no tener una comunicación bidireccional con los damnificados y retrasa la coordinación de ayuda, la evacuación de personas y la distribución de suministros, es por ello que Priyanka Rawat et al. (2015) mencionan que como máxima prioridad se debe aplicar operaciones de socorro a las personas, siendo una de ellas el establecimiento/restablecimiento de infraestructuras de comunicación que pudieron haber sido afectadas (p. 3).

Ecuador ha sufrido varios desastres naturales a lo largo de la historia, siendo el terremoto del 16 de abril de 2016 el que más impacto tuvo, afectando en gran medida a la provincia de Manabí. El servicio de cobertura móvil fue uno de los más golpeados, según la Secretaría de Gestión de Riesgos, posterior al terremoto, se registró pérdida del servicio de telecomunicaciones en varias provincias, y congestión de datos 3G con un 30% de fallo de llamadas en las provincias afectadas.

La gestión de catástrofes se puede clasificar en dos fases: la previa a la catástrofe y la posterior a ella. La primera se centra en la mitigación en lo posible de los efectos de la catástrofe mediante sistemas de alerta y, por otro lado, en la fase posterior se realizan las operaciones de

socorro (Lakshmi Narayanan & Ibe, 2012). La fase en la que se debe actuar con rapidez y eficacia es la posterior a la catástrofe, en esta fase se debe tener la capacidad para poder crear infraestructuras de comunicación móvil, las cuales pueden ser diferentes a las convencionales, dependerían de las tecnologías y herramientas disponibles que puedan ser usadas por la población y las autoridades competentes.

Ante este panorama, la implementación de un sistema de comunicación móvil de emergencia utilizando un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV, por sus siglas en inglés) se presenta como una solución innovadora y efectiva como infraestructura temporal de telecomunicaciones para restablecer la conectividad de manera temprana en áreas afectadas por desastres naturales. “Los UAVs desempeñan un papel importante en diversos escenarios complejos gracias a su extraordinaria adaptabilidad, su despliegue rápido y flexible, así como su cómoda transmisión de datos” (Wenbo Jin et al., 2020).

Por ende, el desarrollo del presente proyecto de titulación tiene como finalidad poder suplir la necesidad de cobertura móvil mediante la implementación de un UAV como estación portable para conseguir un rápido y ágil despliegue de un sistema de comunicación móvil temporal de emergencia, con el fin de mejorar la capacidad de respuesta ante las situaciones ya mencionadas. Este sistema no solo tiene el potencial de salvar vidas y reducir el sufrimiento de las comunidades afectadas, sino que también puede servir como un modelo replicable en otras áreas geográficas vulnerables a catástrofes naturales.

Este trabajo tiene como objetivo general: Implementar un sistema de comunicación móvil de emergencia para solventar la falta de conectividad utilizando un UAV, que permita un rápido y efectivo despliegue en la zona que se necesita establecer comunicación, mientras que los objetivos específicos son:

- Investigar y analizar las tecnologías que mejor se acoplen al sistema de comunicación de emergencia, considerando aspectos como ancho de banda, rango de frecuencia, requisitos de potencia, velocidad, cobertura y movilidad, que permita seleccionar los componentes de hardware y software para incorporarse a un UAV y posibilite el acceso a la red inalámbrica.
- Diseñar el sistema de comunicación de emergencia para ser implementado mediante un UAV y brindar conectividad inalámbrica en zonas específicas, solventando la falta de cobertura y capacidad en un tiempo determinado.
- Evaluar resultados de eficiencia, rendimiento, operatividad, autonomía y calidad del sistema.

El sistema que se implementará consta de un UAV de tipo de despegue vertical con ala rotativa, específicamente un quadcopter. Será compuesto por un frame de fibra de carbono por su resistencia y peso, usando un controlador de vuelo que se adapte a las necesidades que se requiere, en este caso de hardware abierto, procesamiento y compatibilidad, además de requerir un transmisor y receptor de buenas prestaciones para tener buena radio de operación. En el mismo se montará la estación móvil implementada en una raspberry Pi 4 que tendrá el núcleo de la red y junto a una Radio Definido por Software (SDR, por sus siglas en inglés) se creará el eNB que proveerá de cobertura móvil celular de 4ta Generación y los usuarios (UE) en tierra se podrán conectar a través de una SIM previamente programada para tener acceso a la red móvil.

Este trabajo abarca varios temas y para exponer los resultados está organizado en 9 secciones a continuación. Esta parte corresponde a la sección 3 y se presenta la introducción al tema. Luego, en la sección 4, se hace una revisión del estado del arte, en donde se muestran los diferentes estudios relacionados a sistemas de comunicación de emergencia usando UAVs e investigaciones de temas que contribuyan con el desarrollo del mismo. Posteriormente se hace una descripción de la investigación en la sección 5, que incluye la metodología utilizada, el diseño del sistema propuesto y la forma en que se lo implementará. En la sección 6 se presentan los resultados obtenidos a partir de las pruebas de funcionamiento del sistema de comunicación de emergencia, se miden y determinan las variables importantes para validar el sistema. Seguidamente, en la sección 7 se describe el aporte que ha generado el proyecto y se contrasta con los resultados de otro trabajo de investigación. Luego, en la sección 8 se encontrarán las conclusiones del proyecto realizado y en la sección 9 se indicarán las recomendaciones para futuras líneas de investigación. Finalmente, en la sección 10 y 11 se expondrá la bibliografía que sirvió para la elaboración del trabajo y los anexos que incluirán un manual de usuario entre otros datos interesantes, respectivamente.

4. Marco teórico

4.1. Estado de arte

Se han llevado a cabo investigaciones que se enfocan en sistemas de comunicación diseñados para situaciones de desastre, tal es el caso de (K. Guevara et al., 2015), donde se expone un sistema que incluye una plataforma de radio definida por software (SDR) basada en un vehículo aéreo no tripulado (UAV) que se puede implementar rápidamente para su uso en escenarios de comunicación de emergencia. Los UAVs sirven como estaciones GSM voladoras y pueden proporcionar cobertura de red celular a los usuarios, utiliza la plataforma USRP (SDR) y opera el software OpenBts.

Asimismo, otro trabajo de investigación se enfoca en el posicionamiento de los UAVs para maximizar el rendimiento de la red, como se presenta en Rahman et al. (2018), donde los autores proponen que para maximizar el rendimiento de un sistema de comunicación basado en UAVs, la posición es uno de los principales factores que afectan a la capacidad disponible para los flujos de datos, por lo que se propone un algoritmo centralizado para posicionar los UAVs de manera eficiente en el área de desastre, lo realiza mediante un controlador de red definida por software que mantiene información actualizada sobre la topología de la red, así como sobre las demandas de velocidad de datos y las rutas de los flujos.

En el estudio de Shaowei Zhang (2020) se propone una solución de cobertura de comunicaciones de emergencia a través del UAV de ala fija basada en 5G. En ella usa estaciones base integradas 5G y combina estaciones base macro terrestres para ayudar a crear redes. De este modo, se realiza una simulación sobre el presupuesto del enlace directo y de retorno del UAV con la estación base 5G. Los resultados de dicha simulación presentaron que, con el uso de una base integrada en un UAV de ala fija, la cobertura de la macro estación base original de 10,7 km aumentó su radio 2.3 km más, resultando en un radio de 13 km, lo cual puede satisfacer las necesidades de cobertura en áreas remotas y comunicaciones de emergencia.

Si bien es cierto, el despliegue de un sistema de comunicación por medio de UAVs es flexible y eficiente en tema de tiempo de implementación, una de las limitaciones más evidentes es la autonomía de la batería, es por eso que, en el artículo publicado por (Kirubakaran & Hosek, 2023) se propone como posible solución el desarrollo de los UAV atados o conectados a una estación fija terrestre para ampliar el tiempo de operación y garantizar un servicio fluido. Los autores presentan este enfoque de implementación de UAV implicando el uso de un automóvil robótico para transporte y establecimiento de

comunicaciones, permitiendo el control remoto por parte del operador. Además, se hace uso de un algoritmo GA que permite optimizar la ubicación del TUAV (Tethered UAV) para maximizar la cobertura y minimizar el número de TUAV desplegados.

Por otro lado, Azari et al. (2020) realizan un estudio basado en la optimización del espectro en las comunicaciones UAV – UAV en redes celulares. Se considera el despliegue de red celular donde los pares de transmisión-recepción de UAV a UAV comparten el mismo espectro con el enlace ascendente de los usuarios hacia la radio base celular. Se analiza y compara el rendimiento de dos mecanismos para compartición de espectro: subyacente y superposición. Además, se evalúa la probabilidad de cobertura y la tasa de ambos tipos de enlaces y su interacción para identificar el mejor para compartición de espectro. Asimismo, en (Ma et al., 2020) se explora la optimización de la maximización del rendimiento de UAV como sistema de comunicación de retransmisión móvil, en el cual se establece un modelo de estación base fija y la ubicación del repetidor móvil es variable. El rendimiento del sistema se optimiza mediante la altura del repetidor móvil y se aplica un algoritmo mejorado de optimización de enjambre de partículas, considera un modelo de pérdidas por propagación en espacio libre. De igual manera en el estudio de Yu et al. (2023) se analiza la optimización de la latencia de los UAV en las comunicaciones de emergencia. Proponen un modelo de sistema de UAV para comunicaciones de emergencia utilizando la computación en el borde, realizando cálculos rápidos entre usuarios y la capa de nube. Se utiliza algoritmos Greedy, Q-learning y Q-learning mejorado para resolver el problema de optimización no convexo. Los resultados de simulación mostraron que los tres métodos pueden disminuir significativamente la latencia de la comunicación.

En situaciones importantes de transmisión de emergencia los UAVs llevarían a cabo una labor adecuada, es por eso que en el artículo de (Guo et al., 2023) se examina una estrategia de escaneo regional de la plataforma de agrupación de UAVs para la radiodifusión móvil de emergencia. Esta estrategia permite realizar operaciones de transmisión de emergencia a gran altura, tales como retransmisión de programas de transmisión de emergencia, adquisición de audio y video en el sitio y rescate de emergencia, eliminar las limitaciones de entornos complicados y cubrir mayor extensión con una planificación razonable de la trayectoria de escaneo de los UAV.

En cambio, en el artículo desarrollado por Zheng et al. (2021) se presenta un estudio basado en un sistema de comunicaciones de emergencia por satélite de tres niveles, exponen las características beneficiosas de este sistema, además implementan una arquitectura de tres

niveles para analizar la información recopilada a través de un satélite de alto rendimiento como ubicación, videos, audios y datos de SMS, lo que permite la transferencia oportuna y precisa de información desde la escena de emergencia hasta el departamento de comando. Con dicha información se planifica el rescate coordinado en el lugar manteniendo una comunicación bidireccional entre los damnificados, el centro de mando y el equipo de rescate en tiempo real. Desarrollan esta idea fundamentada en las limitaciones que tiene un sistema de comunicación terrestre, el cual es afectado en situaciones de desastre y se pierden las comunicaciones, por lo que, teniendo un sistema de comunicación de emergencia por satélite pueden ser más eficientes los organismos de rescate.

Al analizar los sistemas descritos con anterioridad se puede obtener un panorama de lo que se pretende abordar en este trabajo de titulación, lo que corresponde a la integración de las estaciones de cobertura móvil y los UAVs para tener un máximo rendimiento del sistema de comunicación de emergencias, tanto en movilidad y eficiencia de despliegue. La tecnología de comunicación móvil que se pretende usar en este caso será LTE (4G).

4.2. Antecedentes históricos

Según la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas¹ (UNDRR) un desastre se puede definir como una seria interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona una gran cantidad de muertes al igual que pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales que exceden la capacidad de la comunidad o la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos (United Nations, s.f).

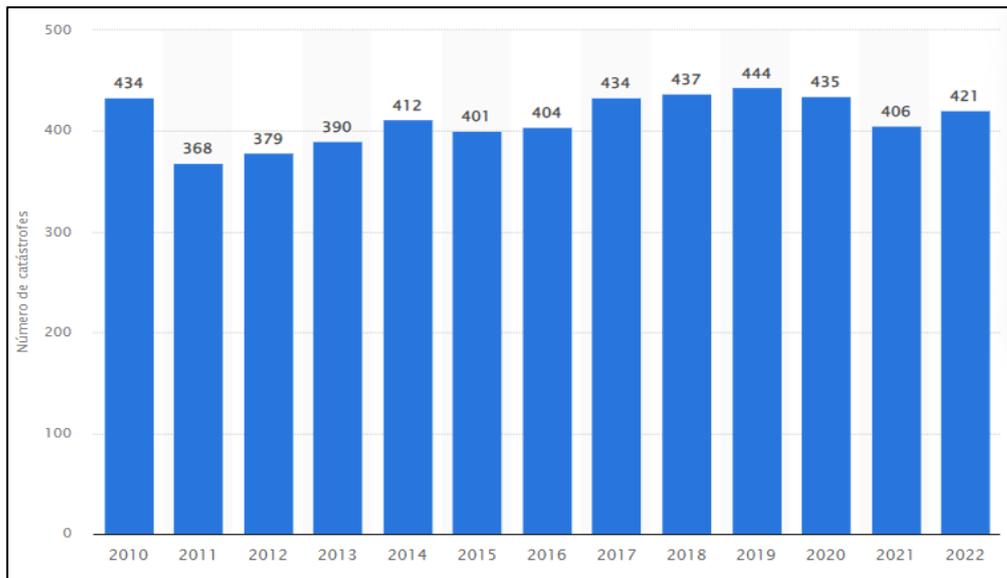
Además, en (Statista, 2024), la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) definen a los desastres naturales como "cambios violentos, súbitos y destructivos en el medio ambiente cuya causa directa no es la actividad humana, sino los fenómenos naturales". Claramente estos sucesos forman parte de los múltiples procesos evolutivos que han existido a lo largo de la historia, sin embargo, en los últimos años se han visto más frecuentes.

En la figura 1 se puede observar el número de desastres naturales ocurridos por año en un lapso de 13 años.

¹ Naciones Unidas (UNDRR): <https://www.un-spider.org/es/riesgos-y-desastres>

Figura 1

Número de catástrofes naturales a nivel mundial de 2010 a 2022



Nota. Imagen tomada de (Statista, 2023)

Estos datos indican que existe un promedio de 400 desastres naturales al año a nivel mundial, lo que lleva a concluir que mientras más desastres naturales se susciten, existirán mayores probabilidades de afectación en la infraestructura de telecomunicaciones y por ende una pérdida en la conectividad.

4.2.1. Terremoto del 2016 en Ecuador

Ecuador se vio afectado por un desastre natural la noche del sábado 16 de abril de 2016. La primera información emitida por el Instituto Geofísico mencionaba que fue un terremoto de magnitud 7.8 con epicentro en la costa ecuatoriana entre las provincias de Esmeraldas y Manabí.

Referente al sector de las telecomunicaciones, un análisis que presenta el Informe de Situación realizado por (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2016, p. 12), indica que:

- Posterior al terremoto se registró pérdida del servicio de telecomunicaciones en varias provincias, y congestión de datos 3G con un 30% de fallo de llamadas en las provincias afectadas.
- El cantón más afectado fue Jama (0 – 30%), seguido de. Sucre, Manta, Rocafuerte, Portoviejo, Olmedo y Bolívar (31-60%), y Pedernales, Flavio Alfaro, San Vicente, Chone, Eloy Alfaro, Pichincha, Puerto López, Montecristi, Paján y 24 de Mayo (61-90%).

- Al 10 de mayo la operatividad del servicio móvil avanzado (voz, texto, datos) es de 96%. CNT: 99%, Movistar: 98%, Claro: 94%. Los operadores trabajan con cuadrillas de alrededor de 600 técnicos. En las principales ciudades el servicio está restablecido al 100%. En los cantones Bolívar (83%) y Rocafuerte (71%) se lo está todavía mejorando.

Figura 2

Estado del servicio a 48 horas luego del terremoto



Nota. Imagen tomada de (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2016)

4.3. Sistema de Comunicación de Emergencia

La existencia de sistemas de comunicación de emergencia son claves para atender los desastres naturales, tener la posibilidad de usar una red de comunicación para intercambiar información en tal situación de crisis adquiere una importancia única, es por eso que mientras se tenga un sistema de comunicación para estar operativo en tales condiciones será muy beneficioso en cuanto a la respuesta de los organismos de rescate para con los damnificados.

Un sistema de comunicación de emergencia debe cumplir con ciertas propiedades como se indica en (Ansari et al., 2008), debe cumplir con un despliegue rápido, robustez y escalabilidad, portabilidad, seguridad y todo con un costo razonable para su implementación y mantenimiento, además de adoptar rápidamente tecnologías disponibles en el mercado.

4.3.1. *Perspectiva general*

El aumento de la población, el rápido proceso de urbanización y el cambio climático están exacerbando la vulnerabilidad de un número cada vez mayor de comunidades e individuos en todo el mundo frente a eventos meteorológicos extremos y desastres naturales. Esto conlleva riesgos significativos de pérdida de vidas, destrucción, desplazamientos, lesiones y daños tanto para las personas como para las comunidades, afectando también a los medios de subsistencia y la infraestructura esencial de telecomunicaciones (ITU, 2021).

Las tecnologías de la información y comunicación (TIC) se presentan como una herramienta esencial para actividades de gestión y reducción del riesgo de catástrofe. La gestión efectiva de estos fenómenos requiere la implementación de infraestructuras y servicios de telecomunicaciones resistentes, así como la formulación de estrategias nacionales que promuevan las comunicaciones y el intercambio de información en todos los niveles gubernamentales, dentro de las comunidades y entre organizaciones públicas y privadas (ITU, 2021).

“Las telecomunicaciones son decisivas en todas las etapas de la gestión de una catástrofe” (Cosmas et al., 2005). Los satélites, radares, equipos de telemetría y pronósticos meteorológicos posibilitan una alerta inmediata de una posible catástrofe, además se puede transmitir información sobre la inminencia del peligro para que se tomen las precauciones necesarias y tener menos consecuencias graves. Cuando la catástrofe sucede, las telecomunicaciones contribuyen a coordinar las operaciones de socorro efectuadas por los organismos competentes. Es evidente que las comunicaciones son necesarias para la prevención y gestión de desastres naturales.

4.3.2. *Retos asociados con las telecomunicaciones de emergencia*

Uno de ellos radica en la necesidad de mantener infraestructuras y servicios robustos en situaciones críticas las cuales ya no solo se limitan a desastres naturales, sino también a las guerras y ataques terroristas, por lo que, la conectividad es crucial para la gestión de emergencias y la coordinación de respuesta.

Otro aspecto influyente es que la población mundial al crecer demasiado rápido provoca que las ciudades se expandan y se es necesario abarcar más territorio con infraestructura de telecomunicaciones.

Los mencionados anteriormente son retos que se podrían sobrellevar con infraestructura de telecomunicaciones enfocada a establecer sistemas de comunicación de emergencia para coordinar y actuar de mejor manera frente a una catástrofe.

4.3.3. La ITU en la reducción y gestión de riesgos

La ITU (Unión Internacional de las Telecomunicaciones, por sus siglas en inglés) juega un papel crucial al subrayar la importancia de las TIC en la reducción y gestión del riesgo de desastres, apoyando a sus Estados Miembros en todas las fases de la gestión de desastres. Esto incluye el diseño de planes nacionales de telecomunicaciones de emergencia, el establecimiento de sistemas de alerta temprana y seguimiento, y el suministro de equipos de telecomunicaciones de emergencia cuando ocurren desastres.

Un Plan Nacional de Telecomunicaciones de Emergencia (PNET) es un documento integral que abarca no solo el marco regulatorio para la gestión del riesgo de desastres, sino también todas las actividades y acciones necesarias en cada fase del ciclo de gestión de desastres, más allá del sector de las TIC. Esto incluye la elaboración de mapas que indiquen la ubicación y tipos de amenazas en el país, el análisis del panorama de telecomunicaciones/TIC, los operadores y proveedores de servicios, la disponibilidad de instalaciones y la penetración de los servicios. Además, el PNET contempla el desarrollo de procedimientos operativos estándar, planes de respuesta y contingencia, y la consideración de tratados y acuerdos de cooperación internacional firmados por el país (ITU, s.f.).

4.4. UAVs y su uso en emergencias

Las personas y las telecomunicaciones se encuentran estrechamente entrelazadas, cuando ocurren desastres naturales o ataques terroristas, la falla de la infraestructura de red es muy probable y tiende a causar cortes masivos de las comunicaciones. Es por eso que una red de comunicación para este tipo de emergencia se vuelve muy importante para las operaciones de rescate.

Una solución por su flexibilidad y eficiencia es una red de comunicación de emergencias mediante el uso de UAVS. Estos actúan como bases aéreas, se despliegan rápidamente y permiten reconstruir de forma temporal la red de comunicaciones y restablecer la conectividad de los usuarios (Peng et al., 2018).

4.4.1. UAVs y sus tipos

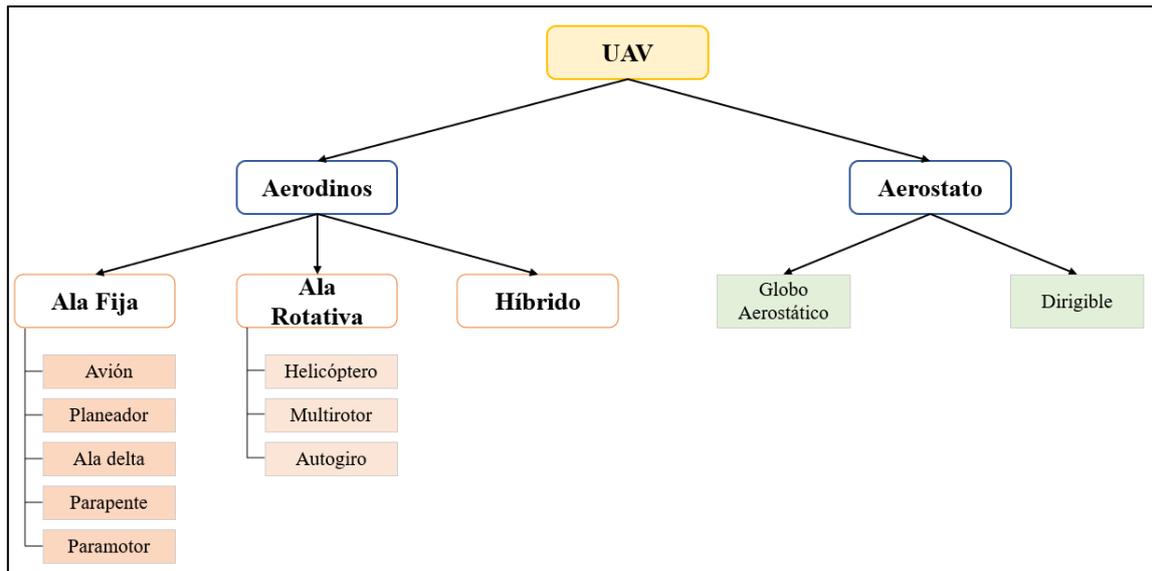
Un UAV es una aeronave no tripulada pilotada por control remoto, también se conocen por sus siglas en inglés como RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) o Drone. Permiten un amplio campo de funcionalidades, desde el uso militar, privado hasta uso civil o de recreación (Villena, 2014).

Hoy en día se dispone de una gran variedad de tipos de aeronaves que cuentan con sus características, es por eso que surge la importancia para entender de mejor forma su funcionalidad y realizar la mejor elección según se necesite.

En la figura 3 se puede observar los tipos de UAV que existen, clasificados de acuerdo al tipo de sustentación, de la misma forma, se identifican los más representativos de cada tipo.

Figura 3

Tipos de UAV



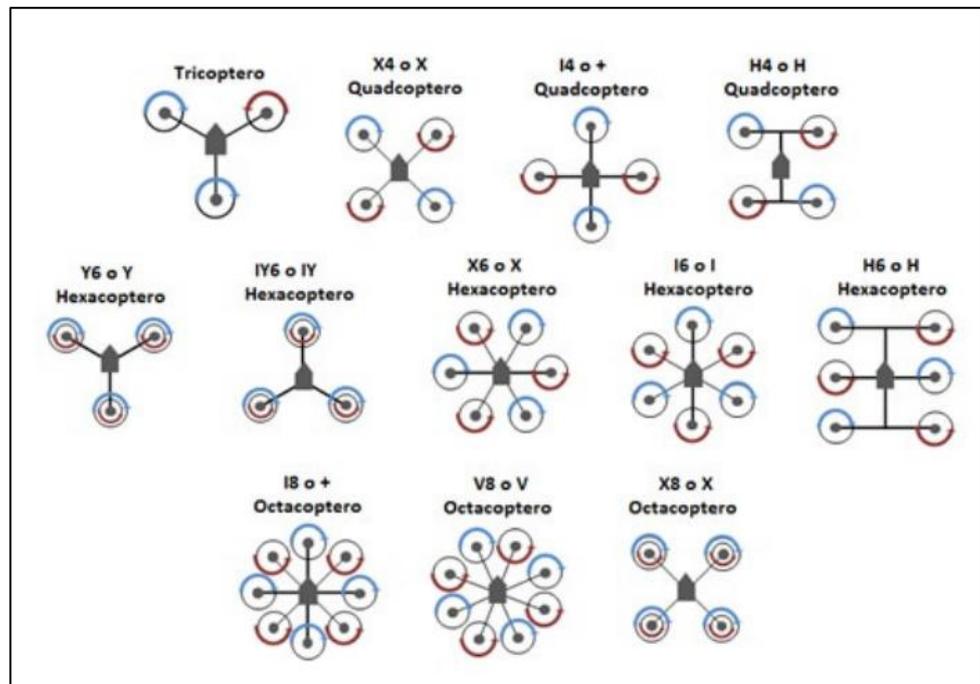
Nota. Imagen tomada y adaptada de (Villalobos et al., 2018)

- **UAVs de ala fija:** Son más ligeros y tienen mayor autonomía, lo que les permite volar hasta mayores distancias, pero necesitan estar constantemente en movimiento. Además, son más silenciosos, lo que los hace muy útiles en tareas de vigilancia (Villalobos et al., 2018).
- **UAVs de ala rotatoria:** Su despegue es de forma vertical y pueden tener vuelos estáticos y se clasifican de acuerdo con su número de rotores (Villalobos et al., 2018):
 - Aeronaves con un rotor principal y un rotor de cola.
 - Drones con un único rotor o singlecopter.
 - Drones con dos rotores en configuración coaxial.
 - Drones con dos rotores en configuración tándem.
 - Multirrotores
- **UAVs híbridos:** Costosos y requieren mayor tecnología. Tienen la capacidad de poder despegar de manera vertical y volar a alta velocidad.

Se utiliza en mayor proporción los de ala rotatoria, específicamente los multirotor, las configuraciones de sus rotores van desde 3 hasta 8 rotores, en la figura 4 se presenta la distribución con su respectivo nombre.

Figura 4

Distribución de los rotores en un UAV



Nota. Imagen tomada de (Juguetecnic, 2017)

4.4.1.1. Quadcopter o quadrotor.

Un Quadrotor es una aeronave que dispone de cuatro brazos que cuentan con motores con hélices en sus extremos que permite elevar el UAV. Su estabilidad corresponde al giro de dos rotores en sentido horario y los dos rotores restantes en sentido antihorario, los efectos giroscópicos y los momentos aerodinámicos tienden a cancelarse en vuelo estacionario.

Consta de dos elementos principales: la estación terrestre o móvil, encargada de la preparación de la misión, la operación y la comunicación de datos con la parte aérea, así como de los componentes que controlan la aeronave. Por otro lado, el subsistema aéreo se compone de una o varias plataformas equipadas con elementos útiles adaptados a la misión (GPS, cámaras de video, sensores), junto con un sistema de transmisión y recepción de información. Además, son de costos bajos y de complejidad de construcción menor a la de un aeroplano, su tamaño puede variar desde algunos centímetros hasta varios metros de longitud, construidos en plástico, fibra de carbono, aluminio, etc.

El movimiento de un cuadricóptero es generado por sus hélices, las cuales giran dos en sentido horario y las otras dos en sentido antihorario, logrando así mantener la estabilidad del equipo siempre y cuando el par generado por los motores sea igual. Al combinar diferentes velocidades en los motores, se producen movimientos de rotación y traslación en la aeronave (Guillén & Manosalvas, 2018).

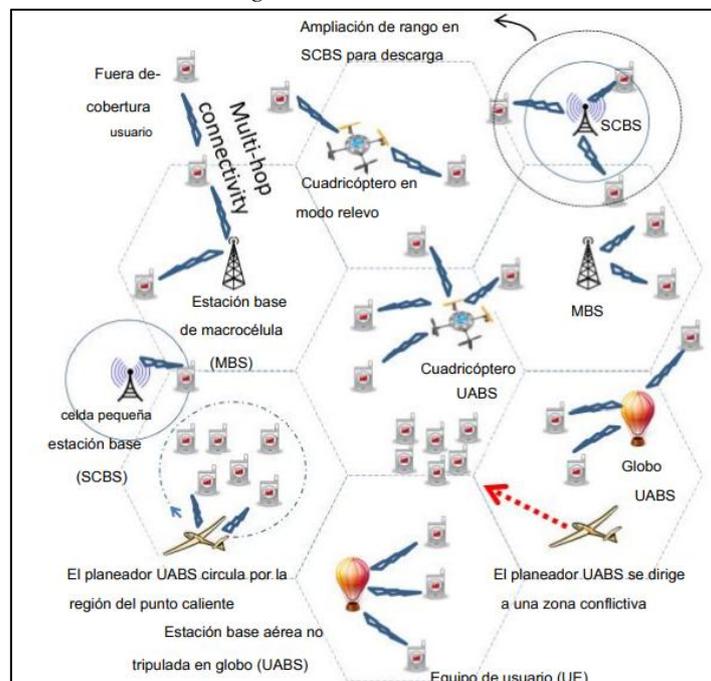
4.4.2. UAVs como infraestructura de comunicación para emergencias

El introducir UAVs para apoyar la gestión de catástrofes es una opción muy prometedora. Usar este sistema por su escalabilidad y movilidad puede, además de la recuperación del servicio de comunicación por las infraestructuras dañadas, aliviar la congestión de una red cuando exista demasiado tráfico celular.

Es posible emplearlos como estaciones bases aéreas, que pueden ser desplegadas rápidamente dentro de una arquitectura de red heterogénea. La figura 5 muestra claramente como se podrían abastecer de cobertura en dicha red heterogénea al implementar diferentes tipos de UAVs, donde los cuadricópteros pueden sobrevolar en un área dense de usuarios, mientras que los planeadores pueden seguir una trayectoria circular, maximizando la infraestructura para robustecer la red y tener mayor conectividad de equipos usuarios (Merwaday & Guvenc, 2015).

Figura 5

UAVs en red heterogénea



Nota. Imagen tomada y adaptada de (Merwaday & Guvenc, 2015)

El tipo de comunicación podría ser de banda ancha 4G y 5G, llegando a crear rápidamente células pequeñas y mejorar la cobertura de la red o restablecer las comunicaciones. Con esto se forma una HetNet que cuenta con la base aérea y base terrestre o estación macrocélula, las cuales pueden tener otra frecuencia que la red de acceso para tener un backhaul de red inalámbrico con buena capacidad.

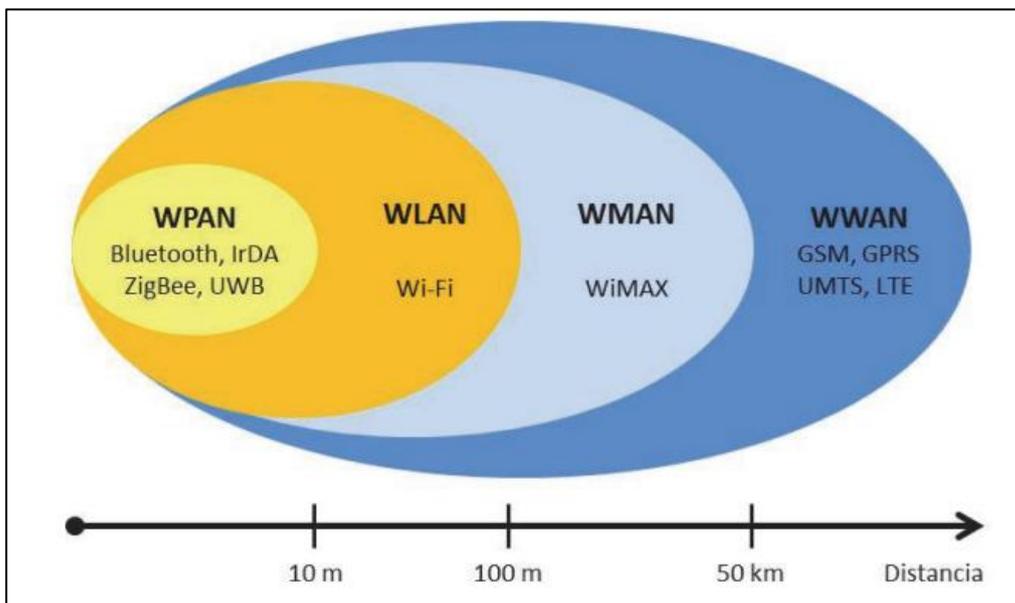
4.5. Redes Inalámbricas

Es una red en la que dos o más terminales, sean nodos u ordenadores, se pueden comunicar sin necesidad de un medio guiado. Estas redes se basan en un enlace que utiliza ondas electromagnéticas, ya sea radio o infrarrojo. Existe una variedad de tecnologías que se diferencian por la frecuencia de transmisión que utilizan, el alcance y la velocidad de sus transmisiones (Ramirez, 2017).

En la figura 6 se observan los diferentes tipos de redes inalámbricas con sus respectivas tecnologías y distancias de coberturas. Se describirá brevemente cada tipo de red y se hará un énfasis especial en la red WWAN por su incidencia para este proyecto.

Figura 6

Clasificación de las redes inalámbricas y sus tecnologías



Nota. Imagen tomada de (Salazar, 2016)

4.5.1. WPAN (Wireless Personal Area Network)

Las tecnologías WPAN posibilitan a los usuarios configurar comunicaciones inalámbricas ad hoc entre dispositivos, como teléfonos celulares y equipos portátiles, dentro de un espacio operativa personal (POS). Este espacio abarca hasta 10 metros alrededor de una

persona. Las tecnologías disponibles para estas redes incluyen Home RF, Bluetooth y RFID (Ramírez, 2017). (Salazar, 2016)

4.5.2. WLAN (*Wireless Lan Area Network*)

Estas redes abarcan distancias de varios cientos de metros y están diseñadas para establecer un entorno de red local entre computadoras o terminales ubicados en el mismo edificio o en un grupo de edificios. Ejemplos de estas tecnologías incluyen Wi-Fi, HomeRF, HiperLAN, etc.

Las WLAN pueden estar constituidas por una arquitectura de red o de manera temporal sin utilizar puntos de acceso. Las WLAN de infraestructura constan de un punto de acceso y estaciones con tarjetas de red o módems externos para poder acceder a la red.

Las WLAN se basan en el estándar 802.11 del IEEE y son comercializadas bajo la marca Wi-Fi, existen tipos de estándares de 802.11, los cuales han ido evolucionando con respecto a sus características de conectividad, banda de operación, ancho de banda del canal, tasa de transmisión, etc. (Yunquera, 2006).

4.5.3. WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*)

Estas redes se fundamentan en el estándar IEEE 802.16, conocido comúnmente como WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), una tecnología de comunicaciones con una arquitectura punto a multipunto que ofrece alta velocidad de transmisión de datos. Mediante WiMAX, es posible interconectar redes inalámbricas LAN más pequeñas, formando así una WMAN.

Según lo menciona (Salazar, 2016), WiMAX es similar a Wi-Fi, siendo la cobertura su gran diferencia. Mientras Wi-Fi está destinado para áreas pequeñas, WiMAX opera en dos bandas de frecuencia, con licencia o sin licencia, de 2 GHz a 11 GHz y de 10 GHz a 66 GHz, pudiendo alcanzar velocidades de transmisión próximas a 70 Mbps en una distancia de 50 km a miles de usuarios desde una única estación base. Puede trabajar con y sin línea de visión directa.

4.5.4. WWAN (*Wireless Wide Area Network*)

Las redes inalámbricas de área amplia se expanden más allá de los 50 kilómetros y generalmente utilizan frecuencias con licencia. Las WWAN pueden mantener grandes áreas, como ciudades y países enteros, usando satélites o infraestructura de red móvil como radio bases (Salazar, 2016).

De manera consecuente se analizará la red de telefonía móvil, puesto que el proyecto se enfoca principalmente en el establecimiento de un sistema de comunicación de emergencia haciendo uso de una red móvil para poder brindar la cobertura.

4.6. Red de telefonía móvil

Los sistemas de telefonía móvil ofrecen a los usuarios la posibilidad de conectarse de manera inalámbrica tanto a la red de telefonía fija como a otros usuarios de sistemas de comunicación móvil. Esta conexión se establece en regiones geográficas extensas que abarcan la mayoría de la población de un país (García et al., 2014).

4.6.1. Funcionamiento

La conectividad de los teléfonos móviles se consigue gracias a los recursos de telecomunicaciones radio y su funcionamiento se basa en los procedimientos de las redes de telefonía fija. La infraestructura final contiene:

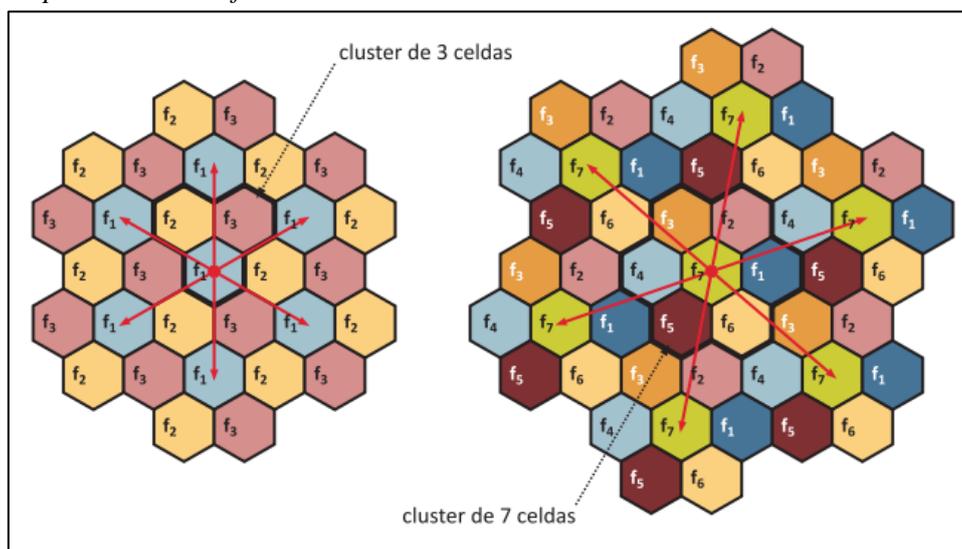
- Estación base (BS Base Station)
- Terminales (MS Mobile Station)

Para la operatividad eficiente de estos dos elementos, se aplica el método usado en sistemas de telecomunicaciones móviles, el cual consiste en la división del terreno en áreas denominadas celdas, las cuales se encuentran a cargo de una estación base.

En la figura 7 se observa un ejemplo de cobertura celular. En donde se tiene las frecuencias separadas por celdas, dependiendo el plan de frecuencias que se tenga, que puede ser normalmente de tres o siete frecuencias distintas, estas celdas son agrupadas por áreas denominadas “cluster” con el objetivo de evitar interferencias.

Figura 7

Tipos de celda en función del área de cobertura



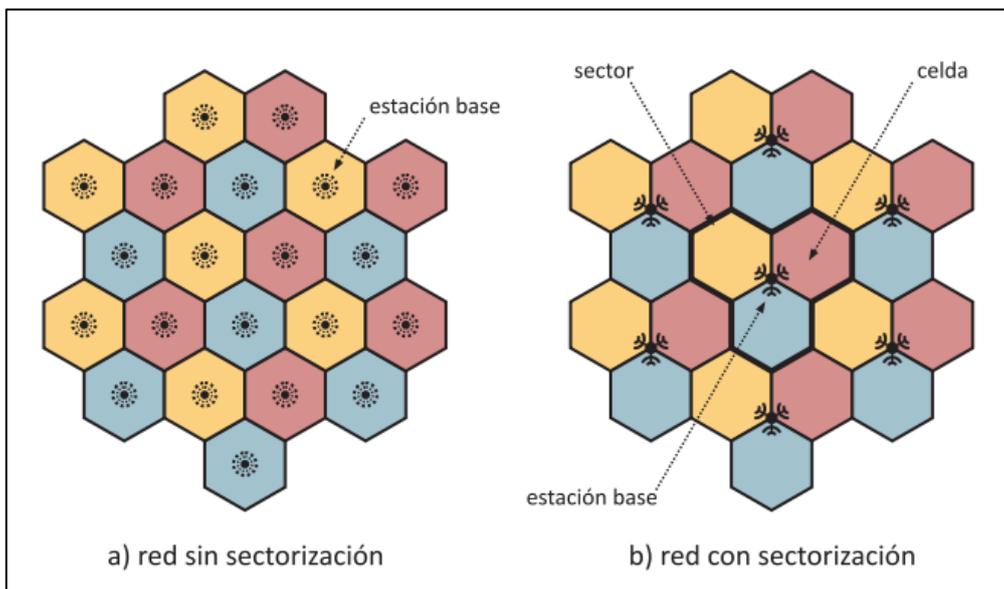
Nota. Imagen tomada de (Becvar et al., 2013)

4.6.1.1. Principio de sectorización

Para lograr una mejor cobertura con la menor cantidad de radio bases se establece este principio de sectorización. Al tener un clúster de 7 celdas en la figura 7, se tiene una estación base por cada celda, ahora, este clúster se lo divide en 21 celdas más pequeñas, dividiendo aún más las frecuencias, pero no incrementa el número de radio bases a 21, ya que, es posible dar cobertura a todas las celdas con 7 estaciones base, bajo la condición de colocar las estaciones en los puntos de intersección de tres celdas adyacentes formando un sector, como se observa en la figura 8 (Becvar et al., 2013).

Figura 8

Principio de sectorización de redes celulares



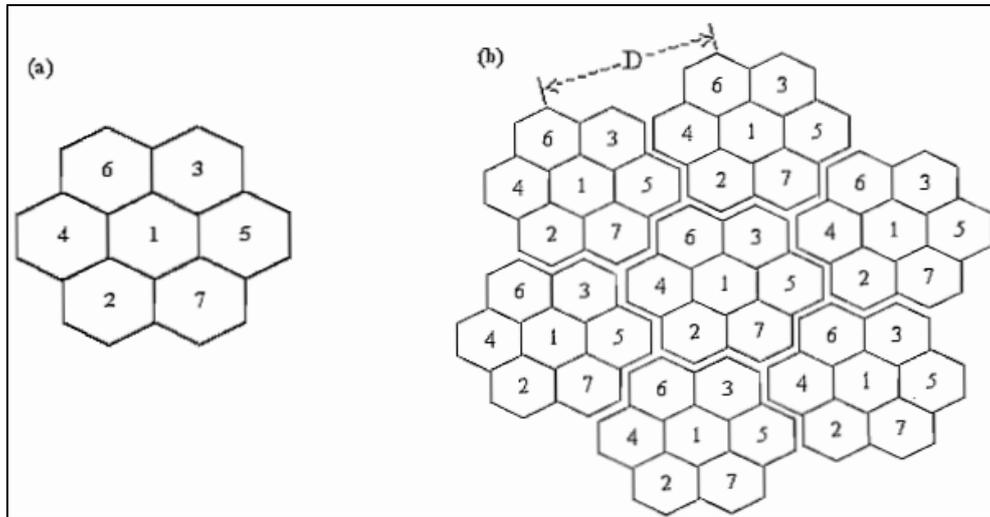
Nota. Imagen tomada de (Becvar et al., 2013)

4.6.1.2. Agrupamiento de las Células y Reúso de Frecuencias

Un clúster de células es un grupo de células idénticas, en el cual están repartidas todos los canales disponibles, de manera equitativa. Uno de los planes de reúso de frecuencia más utilizados es el plan 7/21, donde un clúster es formado por 7 células y el número total del patrón celular N es igual a 21 (Ayala, 2003).

Figura 9

(a) Un clúster de 7 células, (b) Detalle de un plan de rehuso de frecuencias



Nota. Imagen tomada de (Ayala, 2003)

Puesto que el número de canales de frecuencia es limitado, es necesario dimensionar el reuso de las mismas. El cual está definido por:

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad (1)$$

Donde:

D = Distancia de reuso.

R = Radio de la célula

N = Define el módulo o plan y es el número de células totales del patrón celular.

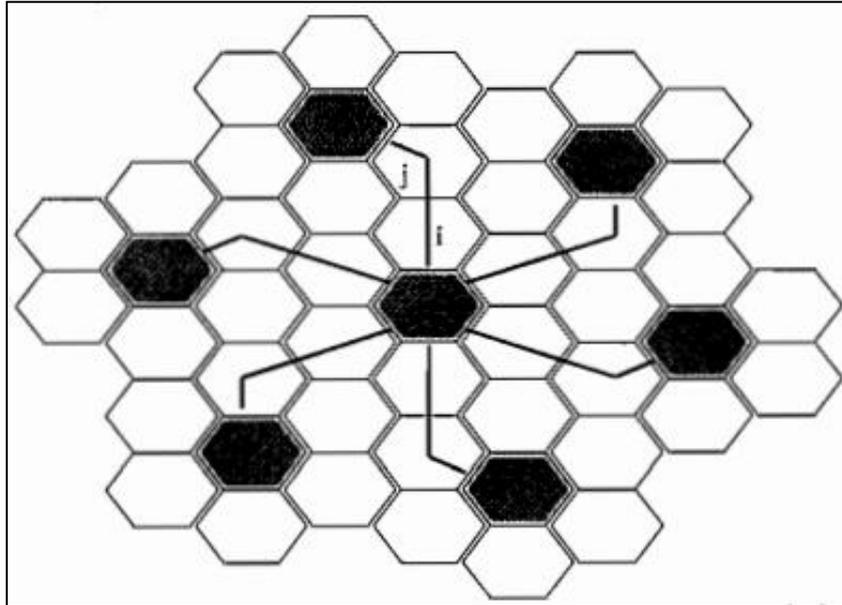
Para la determinación del patrón de reuso y relación D/R, se define i y j como parámetros de cambio de 60 grados, con las siguientes ecuaciones:

$$N = i^2 + ij + j^2 \quad D = \sqrt{i^2 + ij + j^2} \quad (2)$$

En donde N es el número de células en el clúster, i representa el desplazamiento en diámetros desde el centro de una célula en forma radial por cualquier lado del hexágono, j representa el desplazamiento en diámetros a partir de donde termina i con dirección de 60° antihorarios, con respecto a la dirección de i. Por ejemplo, para un plan de reuso de frecuencias 7/21 donde N= 21, los parámetros i y j toman valores de 4 y 1, como se muestra en la figura 10.

Figura 10

Patrón de reuso y relación D/R.



Nota. Imagen tomada de (Ayala, 2003)

4.6.2. Modos de transmisión

Los modos de funcionamiento de un sistema de comunicaciones móvil están fuertemente relacionados con el tipo de equipos empleados en las estaciones base y en los terminales móviles (García et al., 2014):

- **Símplex:** en la comunicación existen dos sentidos de comunicación, el sentido móvil-estación base (enlace ascendente) y el sentido estación base móvil (enlace descendente). Un equipo símplex no puede transmitir (recibir) simultáneamente en los dos enlaces que componen la comunicación.
- **Dúplex:** comunicaciones en los dos enlaces, ascendente y descendente, utilizan portadoras distintas, suficientemente separadas en frecuencia. Un equipo dúplex es capaz de transmitir (recibir) en los dos sentidos simultáneamente. El terminal móvil debe contar con un elemento llamado duplexor que separa los dos sentidos de la comunicación en frecuencia.

4.6.3. Tipos de tecnologías de redes móviles

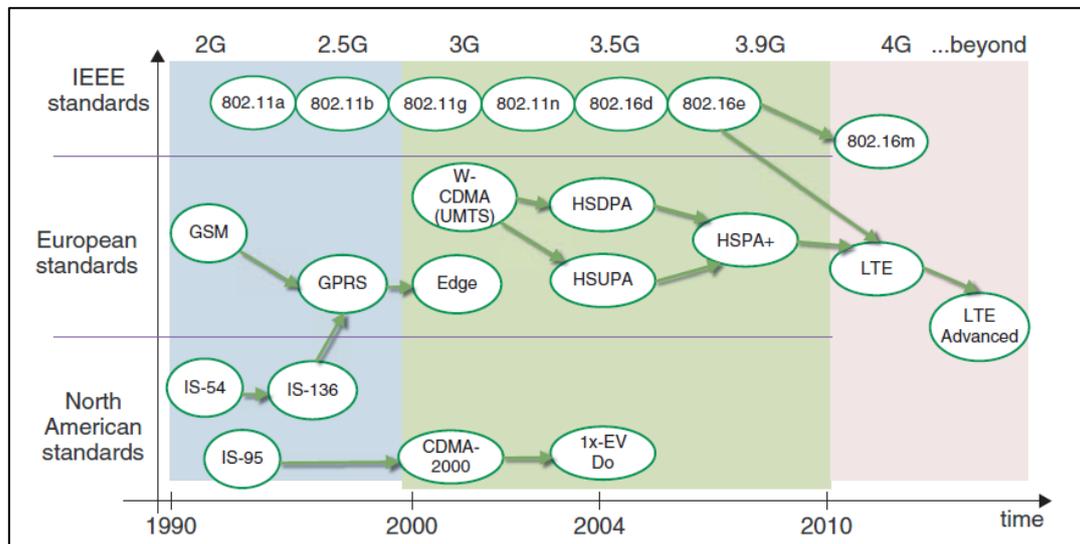
Las tecnologías móviles han progresado a grandes saltos, cada generación de red móvil (2G, 3G, 3G+, 4G, 5G) corresponde a una nueva tecnología (GSM, GPRS, Edge, UMTS, LTE, NR). Con cada evolución tecnológica, la red móvil gana en rendimiento, es decir, la tasa de datos incrementa y con ello se mejora la calidad del servicio existente y permiten nuevos usos

más demandantes como: navegación web, videollamada, videoconferencia, etc (ARCOTEL, 2018).

Uno de los principales avances de los estándares 2G fue introducir el soporte de telefonía móvil y aplicaciones de voz. En cambio, los de 3G introdujeron la comunicación de datos basada en paquetes y con la llegada de 4G se incorporaron redes basadas en paquetes IP que se concentran en satisfacer la demanda de aplicaciones en la web que requieren un gran ancho de banda (Rentas, 2015). En la figura 11 se pueden observar los avances de los estándares desde 2G hasta llegar a 4G con lo que se tiene un avance significativo y a continuación se define a los principales estándares de las generaciones y se hará un énfasis importante en LTE.

Figura 11

Evolución de los estándares de redes móviles



Nota. Imagen tomada de (Rentas, 2015)

4.6.3.1. Red Móvil de 2da Generación: GSM.

GSM es un sistema celular digital que aún continúa siendo ampliamente utilizado. Este sistema fue desarrollado como un estándar europeo abierto y su despliegue permitió resolver la itinerancia internacional o roaming, es decir, que un mismo terminal móvil pueda operar con un único número de teléfono en todos los países que adoptan este sistema (Becvar et al., 2013).

La ARCOTEL menciona las siguientes características:

- Velocidad - 14kbps a 64 Kbps
- Banda de frecuencia - 850 - 1900 MHz (GSM) y 825 - 849 MHz (CDMA)
- Ancho de banda / canal - GSM divide cada canal de 200 kHz en bloques de 25 kHz El canal CDMA es nominalmente de 1,23 MHz
- Multiplexación / Tecnología de acceso - TDMA y CDMA.

- Conmutación - Conmutación de circuitos

4.6.3.2. Red Móvil de 3ra Generación: UMTS.

UMTS puede operar con un espectro mínimo de 2 x 5 MHz para la banda de frecuencia asignada a un par UMTS FDD y una banda de frecuencias de 5 MHz en UMTS TDD. Las bandas de frecuencia asignadas son algo diferentes para Europa y EE.UU. En Europa, se asignaron las bandas de frecuencia UMTS TDD en la banda de 1900-1920 MHz para el enlace ascendente y en la banda de 2010- 2025 MHz para el enlace descendente. En UMTS FDD se asignan bandas de frecuencias en el rango de 1920-1980 MHz para el enlace ascendente y en el rango de 2110-2170 MHz para el enlace descendente (Becvar et al., 2013).

Son múltiples y de gran importancia las características de esta generación:

- Estándares: UMTS (WCDMA) basado en GSM (Global Systems for Mobile) infraestructura del sistema 2G, estandarizado por el 3GPP. CDMA 2000 basado en la tecnología CDMA (IS-95) estándar 2G, estandarizada por 3GPP2.
- Velocidad: 384KBPS 2Mbps
- Ancho de banda: de 5 a 20 MHz
- Tecnologías de multiplexación y acceso
- Servicios - telefonía móvil de voz, acceso a Internet de alta velocidad, acceso fijo inalámbrico a Internet, llamadas de video, chat y conferencias, televisión móvil, servicios basados en la localización, telemedicina, navegación por Internet.

4.6.3.3. Red Móvil de 3ra Generación (3.5G): HSPA.

HSDPA (High speed downlink packet Access) se basa en la Release 5 de la 3GPP (3rd Generation Partnership Project), que se presentó en marzo de 2002; HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) forma parte de la Release 6 de la 3GPP, emitida en diciembre de 2004, a las dos tecnologías se las denomina HSPA (High Speed packet Access). Llega hasta una modulación de 64QAM y permite alcanzar velocidades de hasta 42 Mbit/s, gracias al uso de antenas duales (López, 2013).

4.6.3.4. Red Móvil de 4ta Generación (4G): LTE / LTE-A.

Long Term Evolution (LTE) se define en la Release 8 y 9 de 3GPP. LTE utiliza acceso OFDMA y SC-FDMA para enlaces descendente y ascendente respectivamente. El primer estándar considerado como 4G es LTE-A (Long Term Evolution - Advanced), estandarizado en junio de 2011 según la Release 10 de 3GPP. Este estándar es una evolución del anterior LTE, y se basa en los mismos principios que estas versiones de LTE. Sin embargo, está alineado con los requisitos establecidos por la ITU, conocidos como IMT-Advanced. LTE-A

introduce agregación de portadora, coordinación de la interferencia entre celdas, o mejoras en la transmisión de múltiples antenas (MIMO) y permita tasas de datos máximas de hasta 1 Gbps (Becvar et al., 2013).

4.7. Long Term Evolution (LTE / LTE-A)

Se considera una evolución de la red utilizada en ese entonces, es decir de 3G, también se denominó EUTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network), para desarrollar tal evolución se dividió el trabajo por objetivos y se iban realizando Releases. Se definió que con esta nueva generación de red móvil debía tratarse de un sistema optimizado basado en la conmutación de paquetes, con mayor tasa de bit, disminuir latencias y soportar tecnologías de acceso radio. Algunos objetivos que se propusieron fueron los siguientes, según el Release 8 de 3GPP:

- Aumento de las tasas, 100 Mbps en enlace descendente / 50 Mbps en enlace ascendente) así como en el borde de las celdas.
- Eficiencia espectral mejorada.
- Reducción de latencia (menor de 10 ms).
- Ancho de banda escalable lo que permite mayor flexibilidad en las asignaciones de frecuencia.
- Reducción de gastos operativos y de capital, incluida la red de retorno.
- Soporte para interfuncionamiento con sistemas 3G existentes y sistemas no-3GPP especificados.
- Soporte eficiente de los diversos tipos de servicios, especialmente del dominio PS (Packet switched).
- Optimización para baja velocidad móvil pero compatible con alta velocidad móvil (hasta 500 km/h).

Todo esto apunta a que se consigue una mejora significativa del sistema UMTS de 3G, por ende, en la página oficial de la ETSI² se presentan algunas de las principales diferencias:

- UMTS empezó con un enfoque en datos conmutados por circuitos, luego se mejoró a través de canales compartidos y HSPA ya tenía la dirección de un sistema conmutado por paquetes, mientras que LTE es un sistema puro de conmutación de paquetes.
- UMTS usaba CDMA, LTE usa OFDMA para enlace descendente y SC-FDMA para enlace ascendente.

² Página oficial de la ETSI “EVOLUCIÓN A LARGO PLAZO (LTE)”: <https://www.etsi.org/technologies/mobile/4g>

- UMTS tiene un ancho de canal de 5MHz, LTE permite 6 anchos de banda de canal diferentes: 1,4 – 3 – 5 – 10 – 15 – 20MHz.

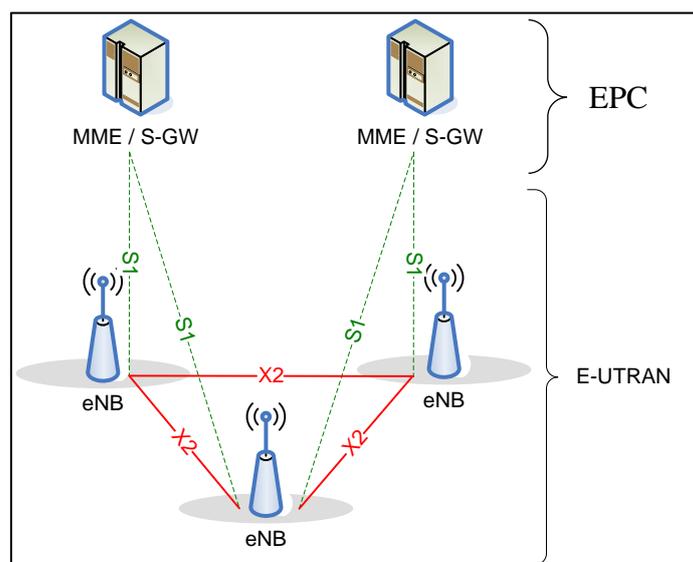
Posterior a la aparición de LTE, llegó en el Release 10 “LTE-Advanced”, el cual se enfocó principalmente en mejorar capacidades de transferencia, cumpliendo los requisitos de IMT-Advanced de la ITU, los mismos que se refieren al aumento de velocidad de transmisión en DL y UL de 3Gbps y 1,5Gbps respectivamente, tener mejor eficiencia espectral, mayor número de usuarios activos simultáneamente y añadiendo MIMO 2x2 para DL consiguiendo una mejora en el borde de las celdas.

4.7.1. Arquitectura

La arquitectura de LTE denominada formalmente en las especificaciones como Evolved Packet System (EPS) contempla dos partes interconectadas, por un lado, se encuentra el núcleo de la red denominado Evolved Packet Core (EPC) y por otro se encuentra la Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) la cual consta de eNB interconectados entre sí por la interfaz X2. Cada eNB está conectado al EPC a través de la interfaz S1. En el plano de usuario, la interfaz S1 se conecta con el Serving Gateway (S-GW), mientras que en el plano de señalización termina en la Mobility Management Entity (MME). Los eNB son puntos de la red de acceso para los Equipos de Usuarios o User Equipment (UE) (3GPP, 2014). En la figura 12 se puede observar la interconexión entre los elementos de la arquitectura de la red LTE.

Figura 12

Arquitectura LTE



Nota. Imagen tomada del Release 8 (3GPP, 2014)

Se genera una arquitectura plana y se distribuye la “inteligencia” en la red para conseguir acelerar la conexión y reducir el tiempo de transferencia entre estaciones base, este proceso se denomina handover y es vital para una sesión de datos en tiempo real que el usuario esté realizando.

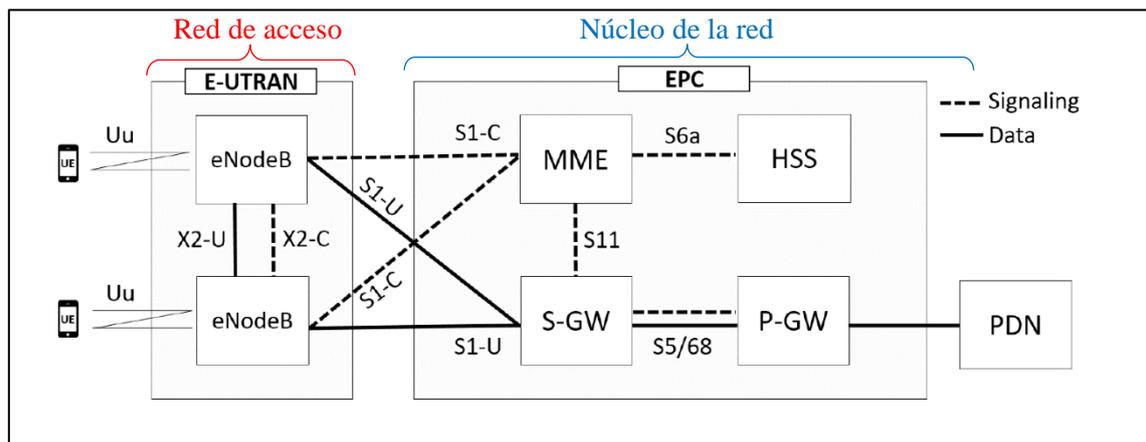
El EPC es un entorno que proporciona voz y datos convergentes en una red LTE. Al ser una red de paquetes se usa el protocolo IP, además con la implementación de una arquitectura unificada, se puede manejar el tráfico de forma más eficiente.

Los eNB son estaciones base complejas que controlan las comunicaciones de radio con múltiples UE en cada celda y gestionan los recursos de radio y las decisiones de transferencia. Se puede definir sus funciones de la siguiente manera: Control de portador de radio (quién tiene asignado el recurso), control de admisión de radio (quien debe recibir recursos), control de movilidad de la conexión (handover) y asignación dinámica de recursos (Codon, 2019).

En la figura 13 se presenta una arquitectura del EPS cuando tiene UEs conectados al EPC por medio de la red de acceso E-UTRAN. Se puede observar que el EPC está compuesto por cuatro elementos de red: el Serving Gateway (S-GW), el Packet Data Network Gateway (P-GW), el Mobility Management Entity (MME) y el Home Subscriber Server (HSS) (Oueis et al., 2017).

Figura 13

Elementos de la red EPS



Nota. Imagen tomada y adaptada de (Oueis et al., 2017)

Las funciones de los elementos de la arquitectura de red LTE engloban las siguientes acciones:

- **MME:** La entidad de administración de movilidad se encuentra en el plano de Control y realiza la gestión del acceso de los usuarios a través del E-UTRAN. Cada UE al ser

registrado se le asigna un nodo MME según su ubicación geográfica, criterios de carga y demás aspectos. Tiene como función la autenticación y autorización del acceso, gestiona los servicios portadores EPS que se encarga de la señalización, además de la movilidad de los usuarios en modo idle (terminales que no tienen conexión de control) y finalmente se encarga de la señalización para el soporte de movilidad entre EPS y redes externas.

- **HSS:** Es una base de datos que contiene información relacionada con el usuario y la suscripción. Su función es intervenir en la gestión de movilidad, autenticación del usuario, autorización de acceso y establecimiento de llamada y la sesión.
- **S-GW:** Opera en el plano de datos, es el punto de conexión entre la red de radio acceso E-UTRAN y la red central EPC. Provee servicios de enrutamiento al UE para la gestión de paquetes IP entrantes y salientes. Además, sirve de punto de anclaje para movilidad intra-LTE (handover entre eNBs), con otros accesos 3GPP y se encuentra lógicamente conectado al P-GW.
- **P-GW:** Es el punto de conexión entre la red EPC y redes IP externas. Gestiona paquetes IP desde y hacia las redes PDN (Packet Data Network). Tiene las tareas de asignación de direcciones IP o algunas políticas de control y tarifación (Codon, 2019).

Los servidores definidos se encuentran conectados a través de interfaces, (Codon, 2019) las define de la siguiente manera:

- **Interface Uu (de radio/aire entre el eNB y el UE):** Es la interfaz de aire que permite la comunicación entre el eNB con el UE, por la misma se envían mensajes del plano de control como de datos. En el plano de control la señalización se da por medio de mensajes de RRC (Radio Resource Control). En el plano de usuario, la interfaz facilita comunicación directa del móvil UE hasta el EPC.
- **Interface S1 (entre E-UTRAN y EPC):** Permite la conexión entre el eNB con la red troncal EPC. Se compone de dos interfaces diferentes: S1-C o S1-MME para el plano de control y S1-U para el plano de datos, también llamado plano de usuario. Mediante la interfaz S1-C se establece la conexión entre la red de acceso y el MME, a través de la cual se intercambian únicamente los paquetes de control. En el plano de datos, la interfaz S1-U conecta la red de acceso con el S-GW a través del uso de un túnel con el GPRS Tunneling Protocol (GTP). El protocolo GTP-U40 encapsula los paquetes IP y los transporta a través del túnel GTP llevando los datos del usuario.

- **Interface X2 (entre eNBs):** Interfaz entre los eNBs, se utiliza durante un handover. El plano de control opera el protocolo X2 Application Protocol (X2AP), transmite señalización de handover y de administración de recursos de radio. En el plano de usuario se crea un túnel GTP que sirve para comunicar los datos de usuario entre el eNB origen y el eNB destino.
- **Interface S5 (entre S-GW y P-GW):** Permite el envío de paquetes de información entre el S-GW y el P-GW por medio de un túnel GTP.
- **Interface S6a (entre MME y HSS):** Conecta la base de datos de suscriptores HSS con el MME. Utiliza el protocolo Diameter para la transferencia de datos de suscripción y autenticación de usuarios. El HSS registra la ubicación del usuario a nivel de área de tracking.
- **Interface S11 (entre el MME y el S-GW):** En el plano de control comunica al S-GW y el MME durante un handover, coordina la transferencia de los canales portadores de datos.

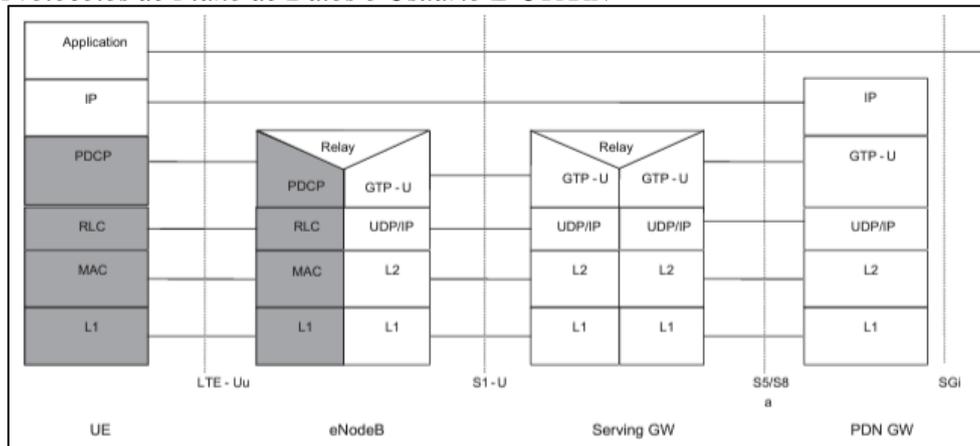
4.7.2. Arquitectura de protocolos

Un stack de protocolos es un conjunto de protocolos estandarizados los cuales permiten la comunicación de los dispositivos realizando negociaciones según sus diferentes capas. Estas capas tienen bases en el modelo OSI, el modelo TCP/IP u otros, donde se establecen las pautas para que dos dispositivos distintos se “entiendan” y puedan establecer una conexión. Los protocolos se dividen según su función. Protocolos relacionados al plano de control, que tienen la función de la señalización entre el UE y el MME, y la pila de protocolos relacionados con el plano de datos, los que permiten que los UEs se comuniquen con los gateways (S-GW y P-GW).

Como se menciona en (Sesia et al., 2011), el paquete IP del UE se encapsula en un protocolo EPC especial y se transmite al UE a través del túnel entre el P-GW y el eNodeB. Diferentes interfaces utilizan diferentes protocolos de tunelización. Las interfaces de red central S1 y S5/S8 utilizan un protocolo de túnel específico 3GPP llamado Protocolo de túnel GPRS (GTP). Los protocolos que se muestran en la figura 14 pertenecen al plano de usuario de E-UTRAN y contiene el Protocolo de Convergencia de Datos de Paquetes (PDCP), Control de Enlace de Radio (RLC) y Control de Acceso al Medios (MAC) que terminan en el eNB en el lado de la red.

Figura 14

Protocolos de Plano de Datos o Usuario E-UTRAN

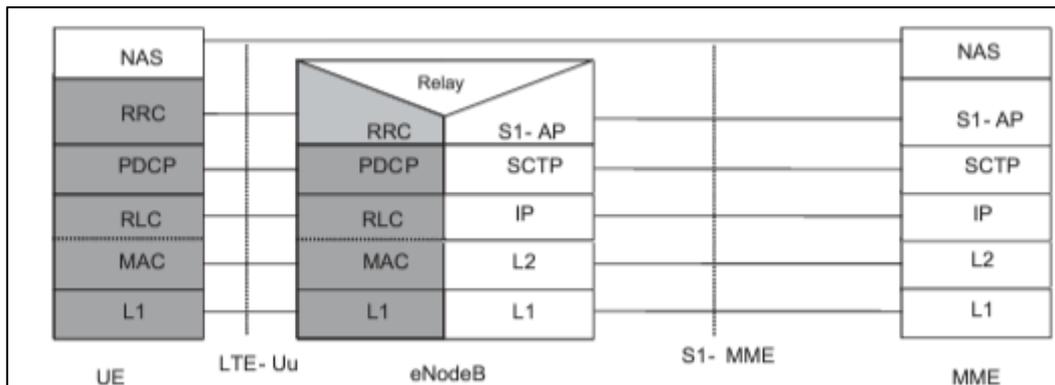


Nota. Imagen tomada y adaptada de (Sesia et al., 2011)

En el plano de control se encuentran presentes los protocolos que se pueden observar en la figura 15.

Figura 15

Protocolos de Plano de Control



Nota. Imagen tomada y adaptada de (Sesia et al., 2011)

Los protocolos coloreados de gris en las figuras se refieren a los protocolos de acceso (Access Stratum Protocol), permiten al UE adquirir las capacidades de accesibilidad a los servicios de la red. Los demás protocolos se encargan del tráfico de mensajes entre el UE y elementos del EPC, como el S-GW, P-GW y MME. A continuación, se describen los protocolos relacionados con la comunicación LTE, (Codon, 2019) presenta una definición simplificada y puntual:

- **L1:** Maneja la capa física, controla la potencia, medición de la interfaz aire y búsqueda inicial de redes LTE disponibles.

- **Medium Access Control (MAC):** Mapea canales lógicos de transporte. Es el vínculo de la capa de transporte con la capa física. Realiza corrección de errores (HARQ), maneja prioridad de los UEs y prioriza canales.
- **Radio Link Control (RLC):** Transfiere a las capas más altas los PDU (Protocol Data Unit). Encargado de reordenarlos si no llegan en secuencia en caso de fragmentación. Cuenta con corrección de errores ARQ.
- **Packet Data Convergence Control (PDCP):** Comprime cabecera IP, gestiona la transferencia con números de secuencia PDCP. Cifra la información y mediante protocolos de control verifica la integridad de la información.
- **Radio Resource Control (RRC):** Etapa exclusiva del plano de control y responsable de la señalización. Maneja funciones de difusión de la información del sistema, paginación y establecimiento, mantenimiento y liberación de las conexiones de radio a través de la asignación de portadoras que establecen conexiones constantes entre los nodos.
- **NAS:** Protocolos de no-acceso, responsable de mantener conexión IP con el UE en movimiento, además del aviso de establecimiento de llamadas, handover y establecimiento de sesiones de datos.
- **Relay:** Estación base de baja potencia equivalente a un repetidor avanzado o mini eNB, brinda servicios a los UEs que se encuentran al borde de la celda, donde la señal es muy débil. Esta capa realiza la decodificación básica de datos y permite la conexión del UE con el eNB para tener funcionalidad completa.

4.7.3. Bandas de frecuencia

En LTE, la frecuencia portadora en el UL y DL está designada por el valor EARFCN (E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number), que oscila entre 0-65535. Es decir, el uso del valor EARFCN se debe a que puede identificar de forma exclusiva la banda LTE y la frecuencia de la portadora. Por ejemplo, la Band 1 y Band 4 pueden tener la misma frecuencia de recepción 2110-2170 MHz, pero su EARFCN es diferente e independiente del ancho de banda del canal (Codon, 2019). En el anexo 1 se adjunta la tabla con todas las bandas LTE a partir de la Release 16.

La relación del EARFCN con las frecuencias portadoras de DL y UL está dada por la siguiente ecuación:

$$F_{DL} = F_{DL_low} + 0,1(N_{DL} - N_{Offs*DL}) \quad \text{para DL} \quad (3)$$

$$F_{UL} = F_{UL_low} + 0,1(N_{UL} - N_{Offs*UL}) \quad \text{para UL} \quad (4)$$

Donde:

N_{DL} = enlace descendente EARFCN

N_{UL} = enlace ascendente EARFCN

$N_{Offs*DL}$ = desplazamiento (offset), cálculo de enlace descendente EARFCN

$N_{Offs*UL}$ = desplazamiento (offset), cálculo de enlace ascendente EARFCN

4.7.4. Modulación

Una alta eficiencia espectral de radio se logró gracias al enfoque de múltiples portadoras para el acceso a los recursos, con ello también permitió una planificación eficiente en el dominio del tiempo y la frecuencia. Para el enlace descendente se consideró OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) y para el enlace ascendente SC-FDMA (Portador Único – Acceso Múltiple por División de Frecuencia).

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) es una tecnología multiportadora que subdivide el ancho de banda disponible en una multitud de subportadoras de banda estrecha ortogonales que transmiten datos en flujos paralelos. Las subportadoras se modulan usando niveles variables de modulación en cuadratura, por lo que, los símbolos OFDM son una combinación lineal de señales instantáneas en cada una de las subportadoras en el canal.

En OFDM se encuentra un prefijo cíclico (CP), el cual se usa para eliminar el ISI (Interferencia Inter-Símbolo), además el espacio entre subportadoras es muy estrecho, permitiendo uso eficiente del ancho de banda disponible.

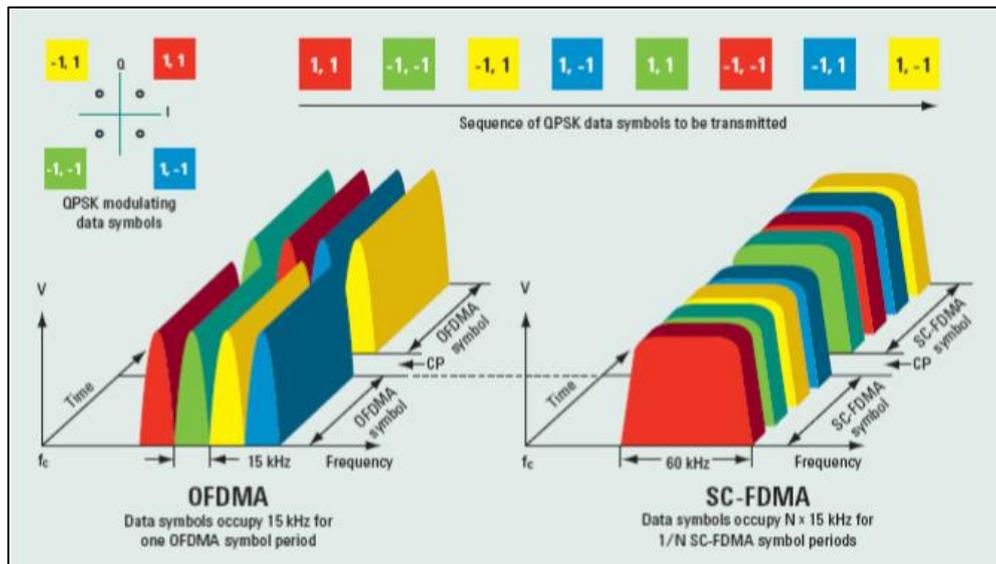
La señal OFDM utilizada en LTE tiene 2048 subportadoras diferentes con separación de 15 kHz. El UE debe ser capaz de soportar la transmisión de 72 subportadoras desde la estación base, de modo que todas las radios bases se podrán comunicar con los UEs (Sesia et al., 2011).

En la figura 16 se muestra una serie de señales moduladas QPSK transmitidas mediante técnicas de SC-FDMA y OFDMA en el dominio del tiempo y la frecuencia. En OFDMA se transmiten en paralelo cuatro símbolos de datos QPSK en los que se modula la fase de cada subportadora y la potencia de la subportadora permanece constante entre símbolos. Una vez transcurrido un símbolo OFDMA, el CP se desactiva y los cuatro símbolos siguientes se

transmiten en paralelo. SC-FDMA transmite los cuatro símbolos de datos QPSK en serie a una velocidad cuatro veces superior, ocupando cada símbolo de datos un ancho de banda de $N \times 15$ kHz (Garg et al., 2012).

Figura 16

Portadoras OFDMA y SC-FDMA



Nota. Imagen tomada de (Garg et al., 2012)

En una señal OFDM se puede elegir el tipo de modulación en cuadratura para la señal LTE, estos son:

- QPSK = 2bps (bits por símbolo)
- 16QAM = 4bps
- 64QAM = 6bps
- 256QAM = 8bps

En la figura 17 se puede observar las tasas de transferencia que se alcanza según el tipo de modulación y el ancho de banda utilizado.

Figura 17

Capacidades según modulación

Modulation coding		1.4 MHz	3.0 MHz	5.0 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
QPSK 1/2	Single stream	0.7	2.1	3.5	7.0	10.6	14.1
16QAM 1/2	Single stream	1.4	4.1	7.0	14.1	21.2	28.3
16QAM 3/4	Single stream	2.2	6.2	10.5	21.1	31.8	42.4
64QAM 3/4	Single stream	3.3	9.3	15.7	31.7	47.7	63.6
64QAM 4/4	Single stream	4.3	12.4	21.0	42.3	63.6	84.9
64QAM 3/4	2x2 MIMO	6.6	18.9	31.9	64.3	96.7	129.1
64QAM 1/1	2x2 MIMO	8.8	25.3	42.5	85.7	128.9	172.1
64QAM 1/1	4x4 MIMO	16.6	47.7	80.3	161.9	243.5	325.1

Nota. Imagen tomada de (Sami, 2018)

LTE se desarrolló en una serie de bandas de frecuencia, desde los 700 MHz hasta los 2,7 GHz con anchos de banda variables de 1,4 MHz hasta los 20 MHz (Sami, 2018).

4.7.5. Trama

En el dominio temporal los recursos físicos del sistema LTE se estructuran siguiendo dos posibles estructuras de trama, las cuales son las siguientes:

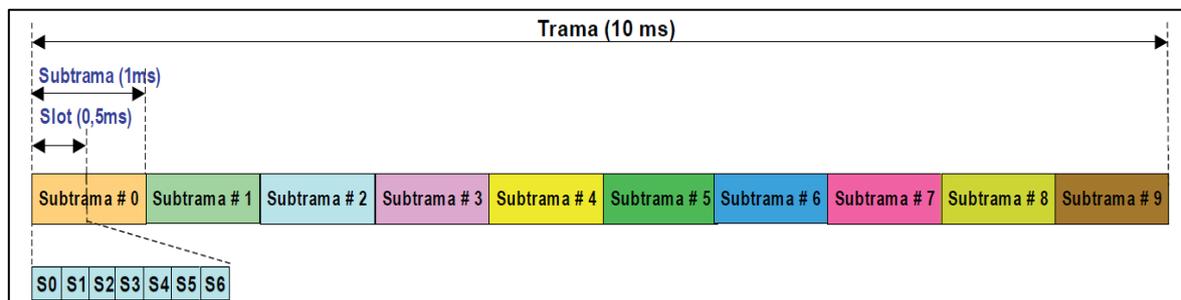
4.7.5.1. Estructura de trama tipo 1

Estructura válida para sistemas que usan duplexado por división de frecuencia (FDD), se aplica tanto al enlace descendente y ascendente, soporta half como full dúplex FDD. Se divide el eje temporal en trama de 10 ms, cada trama está compuesta por 20 ranuras temporales (Slots o TS) de 0,5 ms de duración. Se define una unidad básica de recursos que se forma por ranuras temporales denominada subtrama con 1 ms de duración.

Una representación gráfica de la trama se puede observar en la figura 18, donde se ve además que los usuarios se ubican en determinadas subportadoras, por un intervalo de tiempo pre-definido, determinado por el gestor de recursos de radio (Scheduler) (Agusti et al., 2010).

Figura 18

Estructura de trama tipo 1

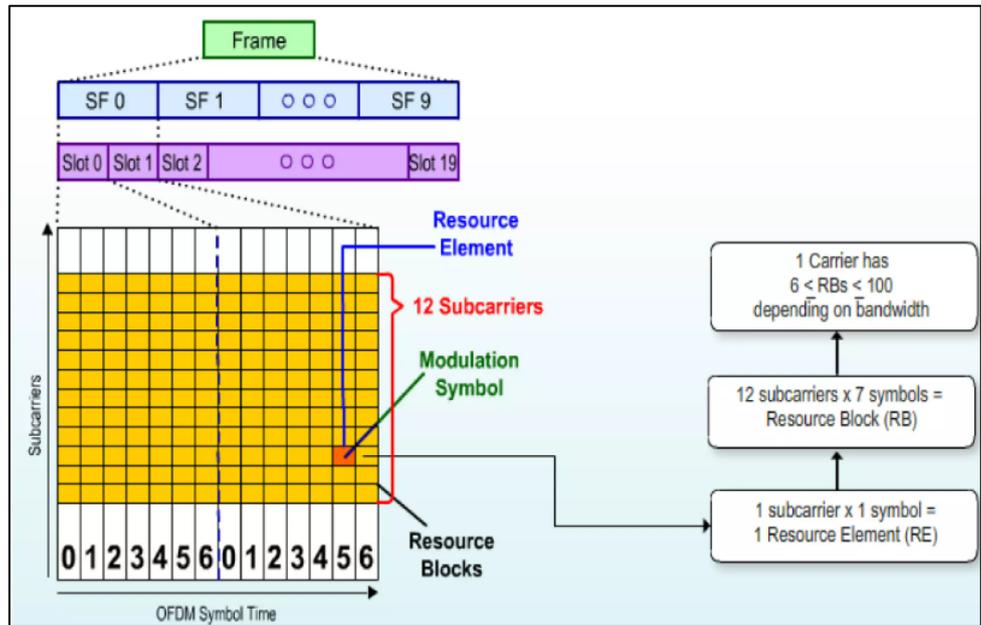


Nota. Imagen tomada de (Agusti et al., 2010)

El panorama completo de la trama de tipo 1 se puede analizar con la figura 19, en la misma se puede observar cómo el eNB asigna recursos a los UEs en términos de Bloques de Recursos (RB – Resource Blocks). Un RB está compuesto por 12 subportadoras en frecuencia y por 6 símbolos OFDM en el tiempo. La unidad más pequeña se llama Elemento de Recurso (RE – Resource Element) compuesto de una subportadora por un símbolo OFDM, representa el símbolo de modulación que transporta de 1 a 6 bits dependiendo el esquema de modulación.

Figura 19

Diagrama del Resource Block y Resource Element



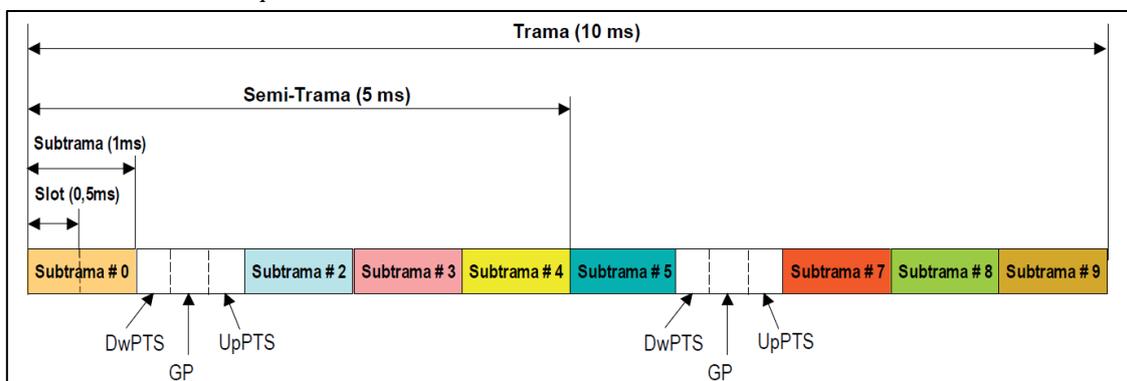
Nota. Imagen tomada de (Aricent, 2018)

4.7.5.2. Estructura de trama tipo 2

Agusti et al. (2010, p. 255) menciona que es una estructura pensada para operar en modo TDD (Duplexado por División en Tiempo), el eje temporal se divide en tramas de 10 ms, cada trama con 10 subtramas de 1 ms. Estructura de trama más flexible que la de tipo 1, ya que contiene subtramas de transmisión tanto para enlace descendente y ascendente, además tiene subtramas especiales con símbolos piloto en DL y UL y periodos de guarda entre transmisión y recepción. Este tipo de trama se observa en la figura 20.

Figura 20

Estructura de trama tipo 2



Nota. Imagen tomada de (Agusti et al., 2010)

4.8. Backhaul de red

Es la red que conecta la red de acceso con la red troncal, también conocida como red de transporte o red de backhaul. Es fundamental en la arquitectura de la red. En sistemas de telefonía móvil, la red de transporte o Mobile Backhaul es crucial para garantizar el correcto funcionamiento de las redes móviles, lo que significa que a través de esta red se transportan los datos y la voz del usuario hacia internet, otras redes móviles y la red telefónica (Hurtado, 2018).

Dentro de los tipos de backhaul de red existen tres medios de transmisión principales, los cuales son los siguientes según (More, 2022):

- **Fibra óptica:** Requiere el tendido de cable de fibra óptica desde un nodo origen hacia un nodo destino, se puede obtener enlaces de hasta 10Gbps.
- **Enlaces de microondas:** Se requiere instalar un equipo en el nodo origen y otro en el nodo destino y que cuente con línea de vista para establecer el enlace de forma inalámbrica. El despliegue es rápido pero las tasas de transmisión son menores que las de la fibra óptica.
- **Enlaces satelitales:** Es el medio de transmisión que puede establecer comunicación en cualquier punto del planeta, una desventaja de este sistema es la latencia entre los nodos. Las tasas de transmisión no son muy elevadas puesto que los satélites se encuentran a gran altitud.

El backhaul satelital tendría mayor relevancia en un sistema de comunicación de emergencia, debido a la continuidad de su funcionamiento frente a desastres naturales, los mismos que comprometerían la infraestructura de los backhaul de red presentes en tierra y los dejarían inoperativos.

4.9. Radio definido por software (SDR)

Según Flores y García (2022) un SDR se define como un radio, cuyos componentes dedicados a realizar funciones de capa física, están implementados en software.

SDR es una tecnología de comunicación que presenta un enfoque donde se propone un sistema de radiocomunicación programable diseñado para generar y recibir señales de radiofrecuencia, es capaz de modificar su funcionamiento y características dinámicamente, como ancho de banda, modulación, codificación, etc.

4.9.1. Arquitectura

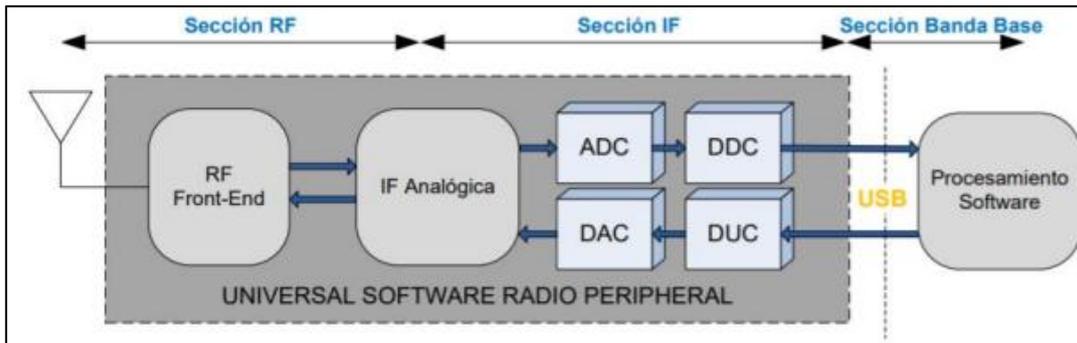
Es una forma de transceptor en el que idealmente todos los aspectos de su funcionamiento se determinan usando hardware versátil de uso general, cuya configuración

está bajo el control del software. En la figura 21 se observa su esquema básico, el cual comprende de tres bloques funcionales.

- Sección de RF, implementada en hardware.
- Sección de IF, implementada en hardware.
- Sección banda base, implementada en Software.

Figura 21

Diagrama de bloques funcionales genérico de un dispositivo SDR



Nota. Imagen tomada de (Gutiérrez, 2021)

La sección de RF se encarga de transmitir/recibir las señales de radiofrecuencia para adecuarlas y convertirlas en frecuencia intermedia en recepción o amplificar y modular las señales de IF en el caso de transmisión.

La sección IF se encarga de pasar la señal de IF a banda base o viceversa y hacer la conversión analógica-digital o digital-analógica de la señal mediante los módulos ADC/DAC. También se utilizan los módulos DDC/DUC para bajar/subir, respectivamente la tasa de muestreo según se requiera recibir o transmitir (Gutiérrez, 2021).

La sección banda base es la encargada de todo el procesamiento en banda base de la señal como modulación/demodulación, análisis espectral de la señal, llevándose a cabo en software (Chamba & Imaicela, 2018).

4.10. Marco legal

La Constitución de la República del Ecuador en su artículo 389 señala que el Estado debe proteger a la población ante desastres y asegurar una respuesta oportuna con la gestión de desastres, garantizando la comunicación e información necesaria para restablecer todo a la normalidad (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008).

4.10.1. Legislación sobre telecomunicaciones de emergencia

En el artículo 8 de la Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT), (Asamblea Nacional del Ecuador, 2015) menciona que el Estado garantizará la provisión de servicio en situaciones de excepción, incluyendo desastres naturales y otras emergencias. Además, el artículo 24

impone a los proveedores de servicios de telecomunicaciones la obligación de integrarse con plataformas tecnológicas que aseguren la continuidad de los servicios de emergencia.

Por otro lado, la Resolución ARCOTEL-2021-0393 establece normas técnicas específicas para servicios de telecomunicaciones de emergencia. Entre ellas exige el acceso gratuito a llamadas de emergencia, difusión de alertas por cualquier medio disponible y la integración con tecnologías externas (ARCOTEL, 2021).

Estas normativas permitirían el uso de soluciones alternativas como estaciones base montadas en UAVs, siempre que se coordine debidamente con las autoridades.

4.10.2. Regulación de UAVs en el espacio aéreo ecuatoriano

Están regulados por la Dirección General de Aviación Civil (DGAC), el cual, exige registro obligatorio, seguro contra terceros y autorización para operar fuera de zonas permitidas. La Resolución Nro. DGAC-DGAC-2020-0110-R, que se encuentra vigente, permiten su uso en diversas aplicaciones, siempre que no se interfiera con zonas de seguridad o actividades de emergencia (Dirección General de Aviación Civil, 2020).

De la misma forma, la Asamblea Nacional (2024) en la Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional (2024) refuerza el control del Estado sobre cualquier aeronave no tripulada, excepciones para fines legítimos, como el apoyo en emergencia.

4.10.3. Políticas públicas que fomentan la innovación en emergencias

El Acuerdo Ministerial Nro. 024-2019 del Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL) expidió la política nacional para servicios de emergencia, fomentando el uso de nuevas tecnologías como Cell Broadcast para la difusión masiva de alertas. Esta política involucra la posibilidad de implementar tecnologías alternativas y vanguardistas como UAVs para mejorar la cobertura en situaciones de desastre o emergencias.

5. Metodología

5.1. Fases del proyecto

Para abordar la realización de este trabajo de Integración Curricular se estructuraron métodos y procedimientos adecuados que permitieron lograr la investigación y cumplir con los objetivos específicos del mismo, en primer lugar, con una revisión sistemática de la bibliografía, se analizaron los trabajos relacionados en los cuales se desarrollaban soluciones similares al presente sistema, con ello se obtuvo un mejor panorama para el diseño del sistema de comunicación de emergencia que se propone.

En el presente proyecto de investigación se usó una metodología de cuatro fases para completar el desarrollo del mismo y darle cumplimiento a cada uno de los objetivos propuestos.

- **Fase de Planificación e Investigación**

Consistió en realizar el análisis de los requisitos para llevar a cabo el proyecto, asimismo, se realizó la investigación acerca del número de catástrofes anual, su incidencia para el país y la urgencia de poder contar con un sistema comunicación de emergencia. Por otro lado, se efectuó la revisión de la literatura con respecto a hardware, software, modelos y características del tipo de UAV, asimismo, tecnologías inalámbricas para montar una red móvil de emergencia y los requerimientos que necesitaría un sistema de este tipo para su funcionamiento.

- **Fase de Diseño del Sistema**

Permitió seleccionar los componentes en hardware para el UAV y para el sistema de comunicación móvil. Se revisó bibliografía sobre el hardware disponible en el mercado, se realizó una verificación en varias páginas web para tener una visión amplia con respecto a costos y luego poder adquirir los componentes que se ajusten a un presupuesto con relación costo-beneficio. Mientras se esperaba la llegada de los componentes al país, puesto que son importados, se obtuvo la preparación para su posterior montaje, revisando y estudiando cuidadosamente el mismo, observando reviews y varios métodos para su ensamble.

Seguidamente se revisó la documentación de los softwares disponibles para el montaje de la red móvil 4G LTE y con ello los requerimientos mínimos para su montaje en el hardware, que para este caso en específico debía ser un dispositivo de procesamiento de tamaño pequeño para que facilite su instalación en el UAV junto al SDR, es por eso que se utilizó una Raspberry Pi 4.

- **Fase de Implementación del Sistema**

Se procederá al montaje del UAV y la implementación de estación móvil con red 4G LTE para iniciar a realizar los primeros vuelos y con ello se obtendrá las primeras perspectivas del sistema respecto a desempeño del UAV y de la red LTE. En estas primeras pruebas se deberán realizar ajustes de acuerdo a la autonomía y calidad de la señal del eNB, será llevada a cabo en un ambiente controlado.

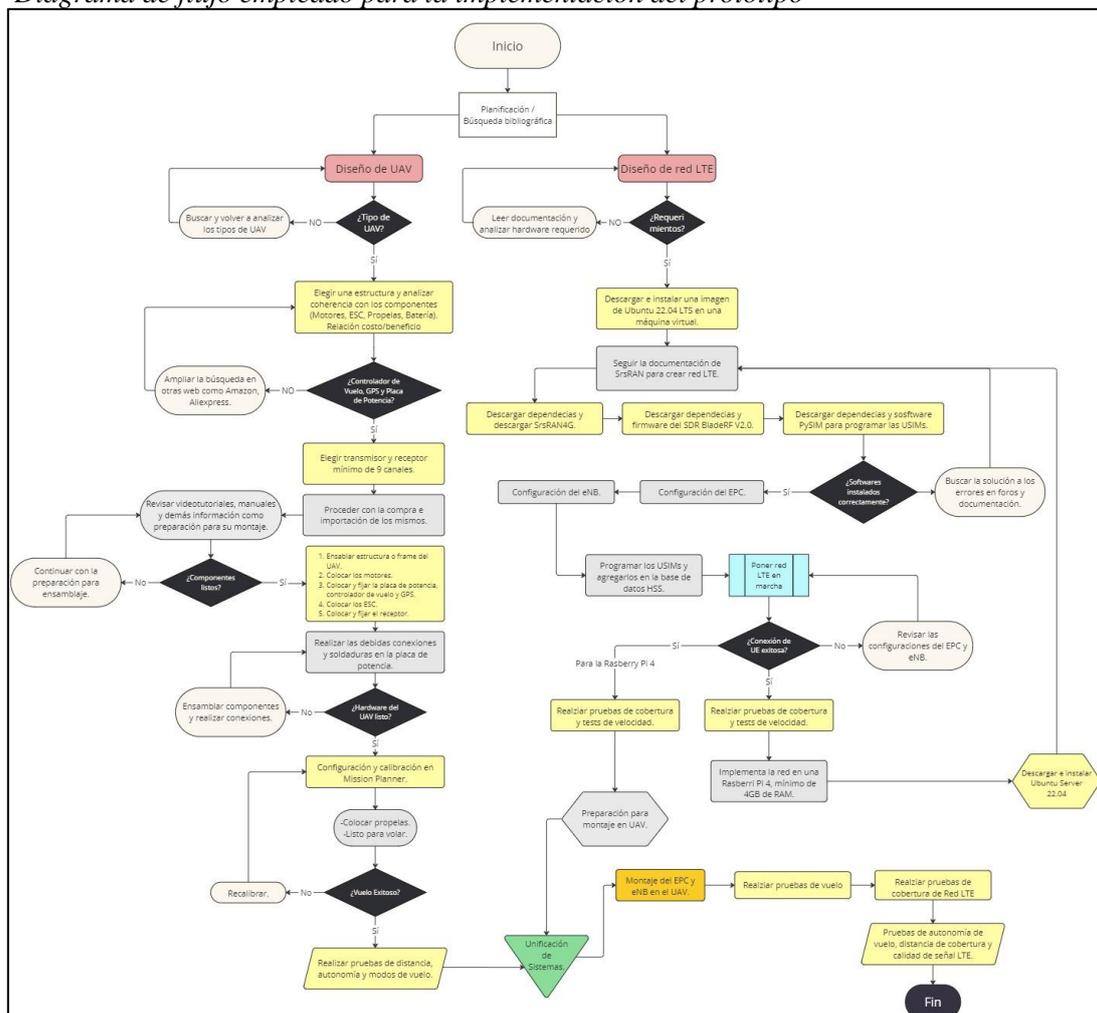
- **Fase de Pruebas de Rendimiento**

Como última fase imprescindible se deberá poner a prueba el sistema de comunicación de emergencia utilizando UAV, en este caso se podrá identificar la capacidad de respuesta de la red móvil desplegada por la estación voladora frente a flujos de datos para su posterior análisis. Se realizará pruebas de cobertura, tasas de transferencia, autonomía de vuelo, delay, entre otras, las cuales permitirán evaluar el sistema finalmente implementado.

Todo el proceso metodológico se puede observar en un diagrama de flujo construido minuciosamente en la figura 22.

Figura 22

Diagrama de flujo empleado para la implementación del prototipo



Nota. Elaboración propia

5.2. Diseño del sistema

En la presente sección se analizará, en primera instancia, el hardware para el UAV, esta información se logró obtener gracias al portal web mediante foros, sitios web, videos y asesorías con una persona especializada en el tema, con el objetivo de poder seleccionar los componentes adecuados para su posterior implementación.

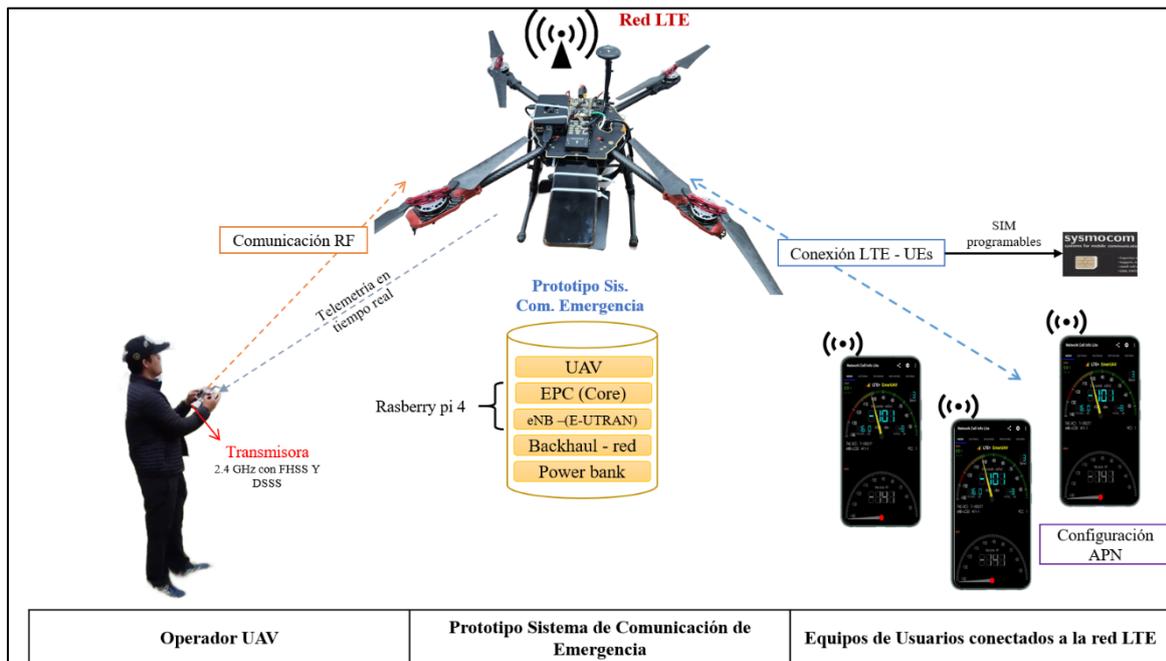
Luego, se procederá al análisis de los requerimientos mínimos de software y hardware para la implementación de la red 4G LTE.

5.2.1. Arquitectura

La arquitectura que se va a usar para el desarrollo y funcionamiento del prototipo es la siguiente:

Figura 23

Arquitectura de prototipo



Nota. Elaboración propia

Como se observa en la figura 23, se tiene 3 momentos clave para lograr el funcionamiento del prototipo, cada uno se lo explica brevemente a continuación:

1. El operador del UAV se encuentra a cierta distancia del prototipo y por medio de la transmisora en la banda de 2.4 GHz, prepara al UAV para su despegue, usando un modo de vuelo que le permite mayor estabilidad y maniobrabilidad inicia el ascenso.
2. La red LTE levantada y lista previamente provee de cobertura LTE a través de la interfaz de acceso a radio eNB que usa el SDR para transmitir y recibir datos. Esta es

la parte clave del prototipo, ya que, es donde se encuentra la unificación de los dos subsistemas que comprende el mismo.

3. El nodo LTE al estar configurado para recibir conexiones simultáneas, los UEs, que cuentan con una SIM programada y debidamente añadida en la base de datos del HSS, se enlazan y pueden hacer uso de la red móvil para sus comunicaciones.

5.2.2. Modelo de UAV

Se ha considerado apropiado un cuadricóptero en X por su diseño simple pero eficiente y más que suficiente para la implementación del sistema de comunicación de emergencia. La disposición de los rotores se muestra en la figura 4, se denomina quadcoptero X4 o X.

5.2.2.1. Estructura o frame

Se utilizó el modelo Tarot 650 Sport, construido en fibra de carbono, material resistente y liviano, cuenta con más espacio, mejor estabilidad e incluye tren de aterrizaje retráctil.

Figura 24

Frame Tarot 650 Sport



Nota. Imagen tomada de la página web de Tarot RC

Tabla 1. Especificaciones y componentes sugeridos - frame tarot 650 sport

Especificaciones y componentes sugeridos	
Diámetro del frame	600 mm
Hélices o Propelas	De 12" a 15"
Motor sin escobillas	-Motor 4S/620KV 4006 TL68P02
	-Motor TL100B08 de 4114/320 kV
	-Motor 6S 380KV 4008 TL68P07
Batería	10 – 15 C, 14,8V – 22,2V, 4000 – 5000 mAH

ESC	20 – 40 A
Peso neto	0,7 kg
Peso Total	1 kg

Nota. Información tomada de la página web de Tarot

5.2.2.2. **Rotores y hélices**

Los rotores elegidos son de la marca Tarot, se trata de motores sin escobillas de 330 KV y 6S de larga duración 4008 aplicable a UAVs multirrotores de larga duración (máquina cuadrirrotor con un peso inferior a 3,5 kg, máquina de seis rotores con un peso inferior a 5 kg). El diseño general del motor es muy bajo, con el fin de aumentar la estabilidad del motor. Se proporciona el disipador de calor activo de alta eficiencia, que genera una temperatura súper baja y mejora de manera efectiva la eficiencia de conversión de energía (Tarot RC, s.f.).

Con respecto a las hélices se eligieron de 15” plásticas de tipo plegables, usan nuevo diseño de lámina de aire optimizado, materiales de alta resistencia, garantizan flexibilidad y estabilidad de alas, como se muestra en la figura 26.

Figura 25

Motor 4008, 330KV, 6S



Nota. Imagen tomada de la página web de Tarot RC

Tabla 2. Especificaciones del motor

Especificaciones del motor	
Número de sección de litio de soporte	6S
Diámetro de instalación de la hélice	10 MM / 12 MM / 34 MM
Hélice	15 – 19 pulgadas
Diámetro del estator	38 mm
Corriente sin carga	20 V – 0,53 A

Grosor del extremo del estator	8
Número de extremo del estator	18 N
Número de polos del motor	24P
Velocidad	330 KV + 5%
Motor externo Diámetro	44,5 mm
Diámetro del eje	4 mm
Altura del motor	22 mm
Corriente continua máxima (1)	30 A
Potencia continua máxima	497 W
Peso del motor	85 G (incluido el asiento de la hélice)

Nota. Información tomada de la página web de Tarot

Figura 26

Hélices de 15" plegables



Nota. Imagen tomada de la página web Aliexpress

Tabla 3. Especificaciones de las hélices

Especificaciones de las hélices	
Modelo del producto	1552
Material	Plásticos de ingeniería ABS
Tamaño	Grosor de paltea: 4mm, Longitud de hoja: 173 mm
Apertura de la hoja	Orificio de montaje de 3 mm

Nota. Información tomada de la página web de AliExpress

5.2.2.3. *Controlador Electrónico de Velocidad (ESC)*

Se ha elegido ESC de 40 A, es un componente electrónico fundamental en el UAV, tiene como función principal regular la velocidad y dirección de los motores sin escobillas. Reciben señales del controlador de vuelo y se le indica la velocidad y dirección que se desea alcanzar. Con eso, los ESC generan pulsos eléctricos precisos que envían a los motores para su control.

Figura 27

ESC de 40 A



Nota. Imagen tomada de la página web de Tarot RC

Tabla 4. Características del ESC de 40 A

Especificaciones de ESC
<ul style="list-style-type: none">• Programa especial de rotor, respuesta rápida del acelerador.• Específicamente para el firmware optimizado del motor de disco, el motor tiene una muy buena compatibilidad.• Capacidad altamente inteligente y adaptativa.• La transmisión de señal para reducir la diafonía generada en el cobre, para que el vuelo sea más estable.• Admite frecuencias de actualización de hasta 621Hz de señal del acelerador máxima• Compatible con varios controles de vuelo• MOSFET de resistencia ultrabaja, fuerte resistencia a la capacidad de flujo

Nota. Información tomada de la página web de Tarot

5.2.2.4. *Batería LiPo*

La batería es uno de los componentes cruciales para el montaje de una UAV, para este caso en específico se optó por elegir una batería LiPo con una química mejorada, ya que está

compuesta de grafeno. Esta batería de marca Turnigy utiliza carbono en la estructura de la batería lo que hace que forme una capa de grafeno de 0,335 nm de espesor, siendo muy delgada pero mucho más potente. Tiene 8000 mAh y es de 6S con 15 C de descarga constante, en la figura 28 se observa la batería y en la tabla 5 se presentan las especificaciones.

Figura 28

Batería LiPo de 8000mAh 6S



Nota. Imagen tomada de la página web de HobbyKing

Tabla 5. Especificaciones de batería LiPo

Especificaciones de las hélices	
Capacidad	8000 mAh
Voltaje	6S1P / 6 celdas / 22,2 V
Descarga	15 C constante / 30 C ráfaga
Peso	1110 g
Enchufe de equilibrio	JST-XH
Enchufe de descarga	XT90

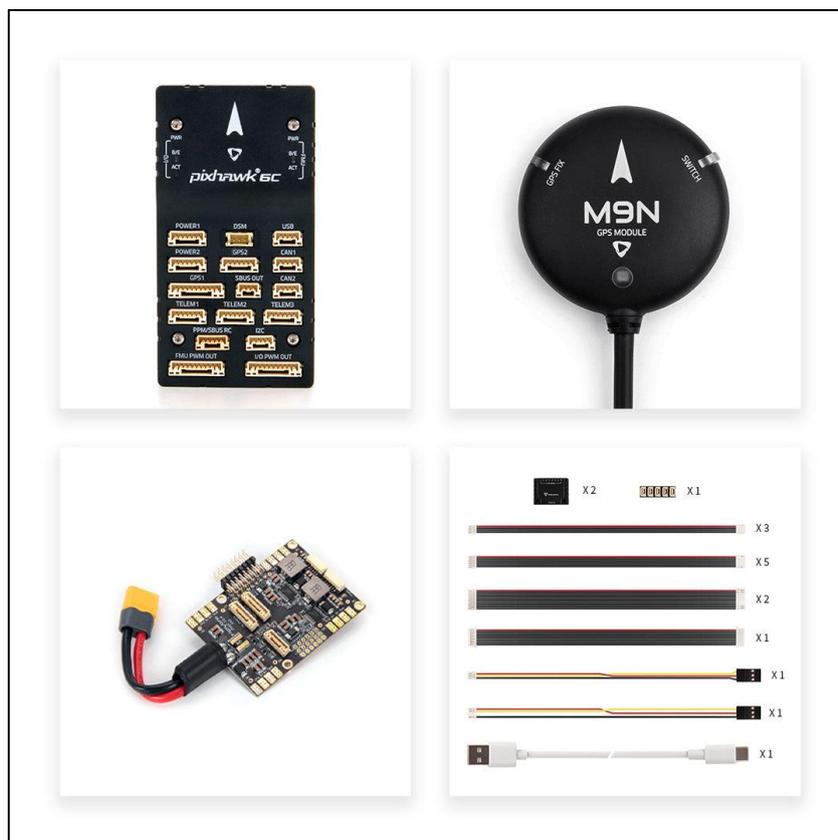
Nota. Información tomada de la página web de HobbyKing

5.2.2.5. Controlador de Vuelo + Placa de potencia + GPS

Es el cerebro del UAV, es el que comanda y permite el control de todos los componentes que integra en UAV, se eligió la Pixhawk 6C que es la última actualización de ese tipo de controladores de vuelo basada en el estándar abierto Pixhawk. La placa de potencia utilizada permitió gestionar de mejor forma las conexiones electrónicas. El GPS usado tiene excelentes propiedades que se complementan con la Pixhawk, utiliza GNSS multiconstelación.

Figura 29

Controlador de vuelo, GPS, Placa de potencia y Grupo de cables



Nota. Imagen tomada de la página web de holybro

Tabla 6. Especificaciones del Controlador de Vuelo, placa de potencia y GPS

Especificaciones Controlador de vuelo (Pixhawk 6C)	
Microcontrolador	H7, núcleo Arm Cortex-M7, funciona hasta 480 MHz
Memoria flash	2 MB
Memoria RAM	1 MB
Acelerador/Giroscopio	ICM-42688-P
Voltaje máximo de entrada	6 V
Peso y dimensiones	34,6 g / 84,8 x 44 x 12,4 mm
Especificaciones Placa de potencia (PM07)	
Voltaje de entrada	2S – 14S
Corriente nominal continua de la placa de circuito impreso	90 A
Clasificación de corriente de ráfaga de PCB	140 A (<60 s)
Salida	CC 5,2 V y 3 A

Peso y Dimensiones	43,8 g / 68 x 50 x 10 mm
Orificios de montaje	45 x 45 mm

Especificaciones GPS (M9N)

Receptor GNSS	Ublox M9N
Número de GNSS concurrentes	Hasta 4 GNSS, BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS, QZSS
	-GPS nivel 1
	-Galileo E1
Banda de frecuencia	-GLONASS nivel 1
	-Beidou B1
	-Nivel 1 de SBAS
	-Nivel 1 de QZSS
Brújula	IST8310
Protocolo de salida	UBX (Bloqueo de U), NMEA
Exactitud	1,5 millones de CEP
Frecuencia de actualización de nav.	Hasta 25 Hz (4 GNSS coincidentes)
Velocidad de baudios	115200
Voltaje de entrada	4,7 – 5,2 V
Tipo de puerto	JST-GH-10P
Antena	Antena de parche de cerámica de 25 x 25 x4 mm
Consumo de energía	Menos de 200 mA a 5 V
Temperatura de funcionamiento	-40 a 80 °C
Peso	32 g
	-LED tricolor
	-Zumbador incorporado
	-Interruptor de seguridad
Otros	- Amplificador de RF LNA MAX2659ELT+
	- Capacitancia recargable de Farah
	- Regulador de 3,3 V de bajo ruido

Nota. Información tomada de la página web de Holybro

5.2.2.6. *Transmisor y receptor*

El mando transmisor que se eligió por su robustez en cuanto a su tecnología de comunicación con el receptor, porque maneja protocolos anti-interferencia como DSSS y FHSS, lo cual hace que la señal sea estable y un control de largo alcance de hasta 3,4 km en el aire. Además, al receptor se le agregó un módulo de telemetría. En la figura 30 se puede observar el modelo del transmisor y receptor, seguidamente de una tabla que indica sus especificaciones.

Figura 30

Emisora y receptor



Nota. Imagen tomada de la página web de Amazon

Tabla 7. Especificaciones de transmisor y receptor

Especificaciones de Transmisor (AT9S-PRO)	
Soporte de canal	10 o 12
Modo de espectro expandido	DSSS Y FHSS/CRSF
Memorias del modelo	15
Rango de voltaje de funcionamiento	7,4 a 18 V
Bandas de frecuencia	Banda ISM de 2,4 GHz (2400 MHz ~ 2483,5 MHz)
Pantalla LCD retroiluminada	Pantalla LCD legible en exteriores, 320 × 480 píxeles y 2,8 pulgadas
Corriente de funcionamiento	DSSS y FHSS < 90 mA a 12 V

Receptor compatible	R12DS, R12DSM, R9DS, R6DS, R6DSM, CRSF de BLACKSHEEP
Especificaciones de Receptor (R12S)	
Voltaje de entrada	4,6 – 10 V
Soporte de canal	12 canales
Peso y dimensiones	13,8 g / 50 x 15 x 32 mm

Nota. Información tomada de la página web de Amazon /tienda Radiolink

5.2.3. *Diseño de red 4G LTE*

En esta sección se describirán los requerimientos tanto en software como en hardware necesarios para la implementación de la red móvil.

5.2.3.1. *Requerimientos de hardware*

Referente al hardware se describirá todo lo que se usó para lograr la implementación de la red 4G LTE, en primer lugar, de forma experimental y para realizar las primeras pruebas piloto, se procedió a implementar la red LTE usando una máquina virtual en una laptop, es por eso que se describirán las especificaciones de la misma. Luego, al haber completado con el ensayo o prueba piloto en la laptop se procedió a realizarlo en la Raspberry Pi 4.

- **Laptop**

Se hizo uso de una portátil Acer Predator Triton 300, en ella se usó VMware para crear una máquina virtual con sistema operativo Linux con la distribución Ubuntu 22.04 LTS, donde se descargaron e instalaron todos los programas para la red LTE, además se llevaron a cabo las configuraciones de las tarjetas SIM para los dispositivos de usuario, cuenta con puertos USB 3.0.

Figura 31

Predator triton 300



Nota. Imagen tomada de la página web de Acer

Tabla 8. Características de portátil

Especificaciones Acer Predator Triton 300	
Procesador	Intel® Core™ i7-11800H
Velocidad del procesador	2,30 GHz – 4.60 GHz
Almacenamiento	512 GB SSD m.2/ 1 TB SSD m.2
Memoria	16 GB
Número de núcleos	8

Nota. Elaboración propia

Figura 32

Raspberry Pi 4 model B / 8GB RAM



Nota. Imagen tomada de la página Plexy Lab

Tabla 9. Características RPi 4B

Especificaciones Raspberry Pi 4 model B	
Procesador	Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit
Velocidad del procesador	1,5 GHz
Almacenamiento	64 GB micro-SD
Memoria	8 GB
Número de núcleos	4
Puertos USB	2 puertos 3.0 y 2 puertos 2.0
Temperatura de funcionamiento	0 a 50 °C

Nota. Elaboración propia

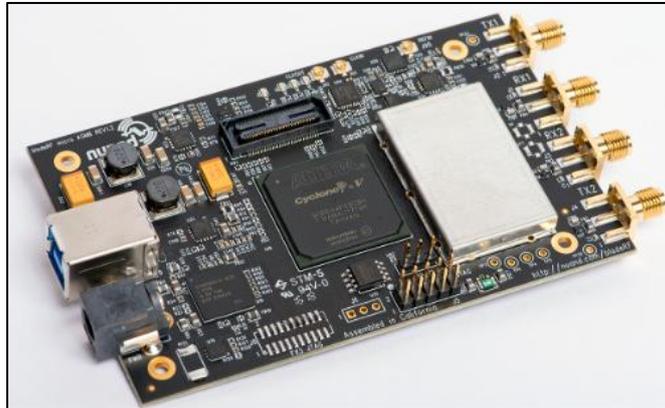
- **SDR**

La implementación del eNB se logró con el uso del SDR disponible en el Laboratorio de Atenas y Telecomunicaciones “BladeRF 2.0 micro xA9” de Nuand. La documentación del software que se usó para la red LTE, indicó que con dicho SDR sí se podía implementar, en la

figura 33 se puede observar el SDR y en la tabla 10 se han recopilado sus especificaciones técnicas.

Figura 33

BladeRF 2.0 micro xA9



Nota. Imagen obtenida de la página oficial de Nuand

Tabla 10. Características del SDR BladeRF 2.0 micro xA9

Especificaciones BladeRF 2.0 micro Xa9	
Rango de frecuencias	47 MHz – 6 GHz
Ancho de banda	56 MHz
Canales	2 TX / 2RX
MiMo	2 x 2
Driver	Blade RF
Conexión con cable USB	puertos 3.0
Software	srsRAN

Nota. Elaboración propia

- **Tarjetas USIM**

Para poder establecer conexión de los UEs con la red LTE fue necesario adquirir tarjetas SIM programables SIM + USIM de la marca SYSMOCOM, modelo sysmoISIM-SJA2 (figura 34) paquete de 10 SIM.

Figura 34

Tarjetas SIM sysmoISIM-SJA2



Nota. Imagen obtenida de la página oficial de Sysmocom

Tabla 11. Características de tarjetas SIM

Especificaciones Tarjetas SIM sysmoISIM-SJA2	
Tiene un formato de triple corte, 2FF (SIM clásica), 3FF (micro SIM) y 4FF (nano SIM)	
Se puede utilizar con cualquier red, desde GSM (2G), UMTS (3G) y LTE (4G), así como 5G	
Contiene todos los archivos de la versión 16 de 3GPP	
IMSI único predeterminado de fábrica y un OPC K+ aleatorio individual para cada tarjeta	
Algoritmo de autenticación de SIM 2G, USIM e ISIM: Milenage	

Nota. Elaboración propia, información tomada de la página de Sysmocom

- **Lector de tarjetas SIM/USIM**

Para la programación de las tarjetas sysmoISIM-SJA2 con parámetros necesarios se realizó utilizando el lector de tarjetas de la marca Omnikey, modelo CardMan 3121 USB CCID interface, se lo puede observar en la figura 34, empleado el software pysim, en la tabla 12 se pueden ver las características del programador.

Figura 35

CardMan 3121 USB CCID interface



Nota. Imagen obtenida de la página oficial de Sysmocom

Tabla 12. Características del programador de tarjetas SIM

Características de CardMan 3121 USB CCID interface	
Tipos de tarjeta	Tarjetas inteligentes de 5 – 3 y 1,8 V, ISO 7816 Clase A, B y C
Estándares	ISO 7816 y EMV2 2000, nivel 1

Protocolos	T=0, T=1, 2 hilos: SLE 4432/42 (S=10), 3 hilos: SLE 4418/28 (S=9), I2C (S=8)
USB	Puerto 2.0 CCID
Sistema Operativo	Windows Linux Mac OS X Android

Nota. Elaboración propia, información tomada de la página de Sysmocom

- **Antena Dipolo Banda Ancha**

Las antenas que se usaron con el SDR fueron de la marca Techtoo (figura 35), son de banda ancha con conector sma macho, en la tabla 13 se muestran las especificaciones técnicas de las mismas. Asimismo, se usó otro par de antenas para aprovechar el mimo 2x2 del SDR, este tipo de antena se puede ver en la figura 36 y en la tabla 13 se indican sus principales características.

Figura 36

Antenas Techtoo – Antenas “5G” de banda ancha



Nota. Imagen obtenida de amazon y aliexpress

Tabla 13. Características de las antenas

Especificaciones de Antenas dipolo Techtoo	
Impedancia	50 Ohm

Alcance máximo	45 m
Rango de frecuencia	698-960/1710-2170/2500-2700 MHz
Ganancia	5 dBi
Diámetro de la antena	14 mm

Especificaciones de Antenas “5G” de banda ancha

Impedancia	50 Ohm
Rango de frecuencia	600 – 6000 MHz
Ganancia	40 dBi
VSWR	<1.5
Material	ABS material

Nota. Elaboración propia, información tomada de la página de amazon y de aliexpress

- **Equipo de usuario**

Para comprobar la conectividad de la red se empleó principalmente un smartphone Samsung Galaxy S22+ (figura 36) como dispositivo de usuario comercial, en el cual se llevaron a cabo las pruebas necesarias para el análisis de la implementación de la red LTE. En la tabla 13 se adjuntan características con respecto a la conectividad del equipo usado.

Figura 37

Samsung Galaxy S22+



Nota. Imagen obtenida de Samsung

Tabla 14. Características del Samsung Galaxy S22+

Características de Samsung Galaxy S22+	
Número de SIM/Tipo	Dual-SIM/Nano-SIM (4FF)
Red 2G GSM	GSM850, GSM900, DCS1800, PCS1900
Red 3G UMTS	B1(2100), B2(1900), B4(AWS), B5(850), B8(900)

Red 4G FDD LTE	B1(2100), B2(1900), B3(1800), B4(AWS), B5(850), B7(2600), B8(900), B12(700), B13(700), B17(700), B18(800), B19(800), B20(800), B25(1900), B26(850), B28(700), B32(1500), B66(AWS-3)
Red 4G TDD LTE	B38(2600), B39(1900), B40(2300), B41(2500)
5G FDD Sub6	N1(2100), N2(1900), N3(1800), N5(850), N7(2600), N8(900), N12(700), N20(800), N25(1900), N28(700), N66(AWS-3)
5G TDD Sub6	N38(2600), N40(2300), N41(2500), N77(3700), N78(3500)
5G SDL Sub6	N75(1500+)

Nota. Elaboración propia, información tomada de la página oficial de Samsung

5.2.3.2. *Requerimientos de software*

En el siguiente apartado se presentan los softwares utilizados para ejecutar la red LTE, en este trabajo se ha considerado usar el software srsRAN, que proporciona funcionalidades de UE, eNodeB y núcleo de la red (EPC) 4G LTE, además de una configuración muy amigable y que tiene soporte para funcionar sobre hardwares reducidos como una Raspberry Pi 4 y es compatible con el SDR que se tenía disponible en el Laboratorio de Antenas y Telecomunicaciones de la Universidad Nacional de Loja.

- **Sistema Operativo Linux – Distribución Ubuntu**

Como base de la implementación se utilizó el Sistema Operativo Linux en su distribución de Ubuntu 22.04 LTS, instalado sobre una máquina virtual en versión de escritorio. Dentro de este sistema se procedió con la descarga y la instalación de los siguientes softwares que se requirieron para la implementación de la red LTE.

Por otro lado, se usó Ubuntu Server 22.04 LTS como sistema operativo en la Raspberry Pi 4, la misma es una interfaz de código donde se realiza cualquier acción mediante líneas de comando.

- **srsRAN**

srsRAN 4G es un paquete de software de radio 4G de código abierto desarrollado por la empresa Software Radio System (SRS). Este software contiene aplicaciones UE, eNodeB y EPC livianas, srsRAN 4G se puede utilizar para construir una red inalámbrica móvil LTE de extremo a extremo completa (srsRAN, 2024b).

La suite srsRAN 4G actualmente incluye:

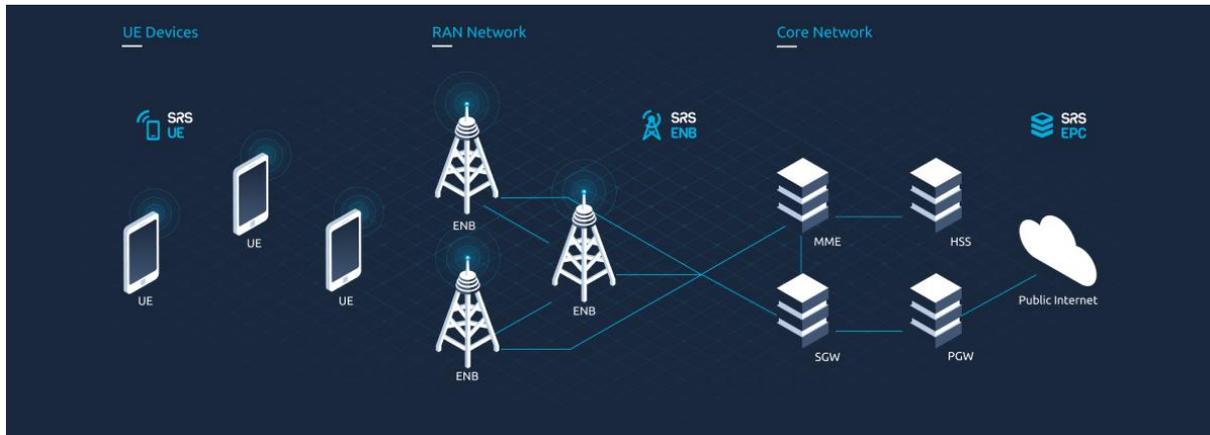
- **srsUE:** una aplicación UE 4G de pila completa con prototipos de funciones 5G
- **srsENB:** un eNodeB 4G de pila completa

- **srsEPC:** una implementación EPC 4G liviana con MME, HSS y S/P-GW

Todo el software srsRAN 4G se ejecuta en Linux con hardware de radio y computador estándar, en la figura 38 se puede observar la arquitectura LTE que ofrece este software.

Figura 38

Suite de Software srsRAN 4G - Arquitectura



Nota. Imagen tomada de (srsRAN, 2024b)

- **Pysim**

Es un software que se puede usar para leer, programar (escribir) y explorar todos los campos/parámetros/archivos en tarjetas SIM/USIM/ISIM/HPSIM utilizadas en redes celulares 3GPP de 2G a 5G. La funcionalidad completa de pySim solo se puede utilizar con las denominadas tarjetas SIM/USIM/ISIM/HPSIM programables (srsRAN, 2024b).

5.3. Implementación del sistema

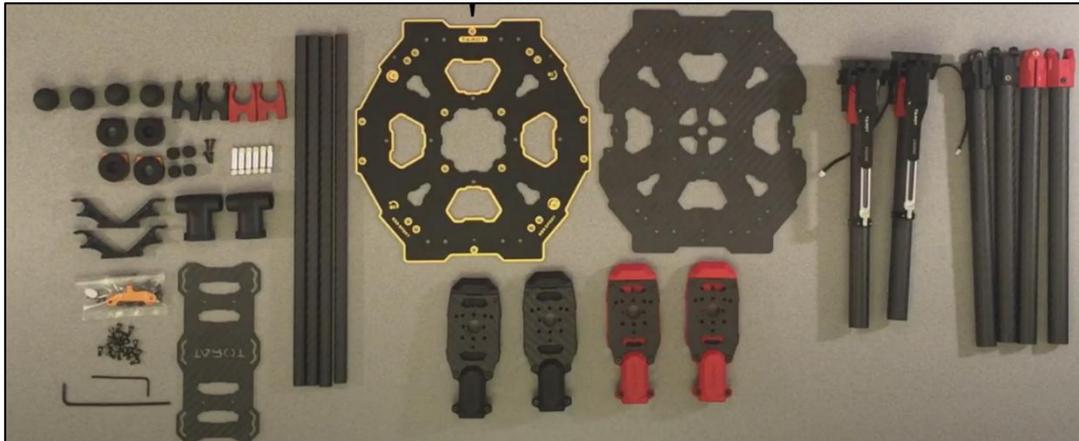
En esta fase se procedió a ensamblar las partes y componentes del UAV, sus debidas conexiones para luego calibrar sus sistemas con la configuración en Mission Planner. Finalmente se procedió a desarrollar la red móvil en la Raspberry pi 4 conjuntamente con en el SDR.

5.3.1. Construcción del UAV

Una vez importados todos los componentes del UAV, se puso en marcha el ensamble de todo el hardware. En primer lugar, se comenzó por la estructura, en la figura 39 se puede observar todos los componentes de la estructura para ser ensamblada.

Figura 39

Estructura del UAV – Frame tarot 650 sport

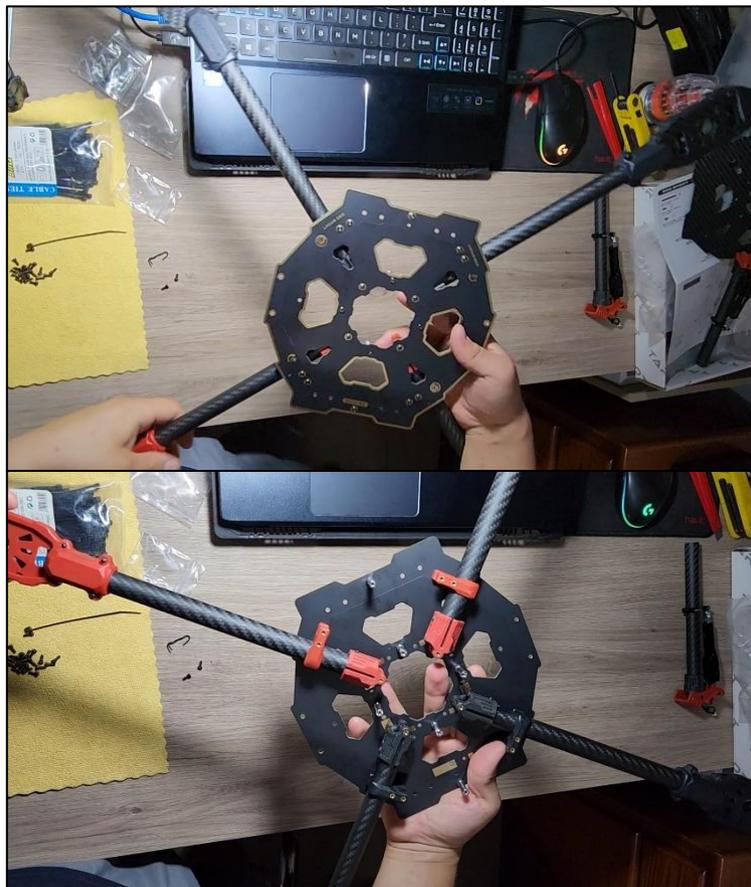


Nota. Elaboración propia

Se procedió entonces a montar los brazos de los rotores en la base central superior de la estructura y a poner las piezas de sujeción para que queden firmes, tal como se observa en la figura 40.

Figura 40

Montaje base central y brazos de los rotores

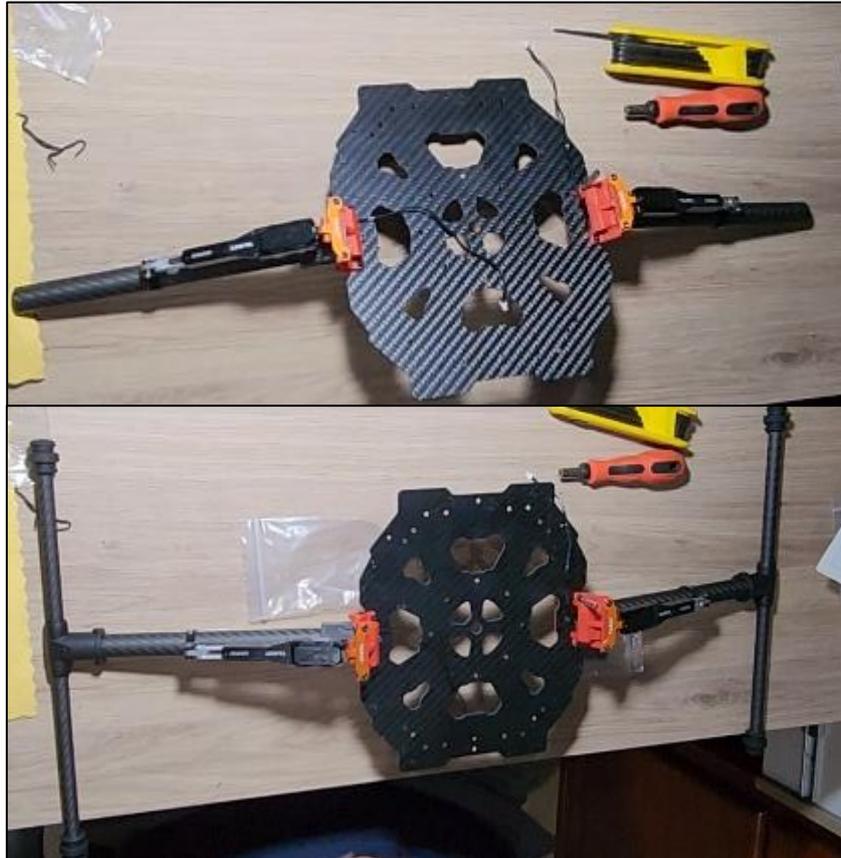


Nota. Elaboración propia

Luego, con la base central inferior se procedió al montaje del tren de aterrizaje retráctil, resultando como se puede observar en la figura 41. En la figura 42 se observa el montaje de la base para la sujeción de la batería.

Figura 41

Montaje tren de aterrizaje en base central inferior



Nota. Elaboración propia

Figura 42

Montaje de base para la batería



Nota. Elaboración propia

Finalmente se debieron unir las dos bases centrales con los tornillos ajustados en los respectivos orificios y con esto se concluyó el ensamble de la estructura del UAV tarot 650 sport, se puede observar en la figura 43.

Figura 43

Unión de las partes ensambladas



Nota. Elaboración propia

Una vez lista la estructura se procedió al ensamble de los componentes del UAV, iniciando por los motores, continuando con los ESC y finalizando con el montaje de la controladora de vuelo Pixhawk 6C, la placa de potencia y el GPS.

Se procedió entonces a montar los motores en los 4 brazos (figura 44), se ajustaron muy bien con 3 tornillos y se los niveló de tal forma que quedaron en paralelo con la superficie.

Figura 44

Montaje de motores



Nota. Elaboración propia

Figura 45

Montaje de los motores completada

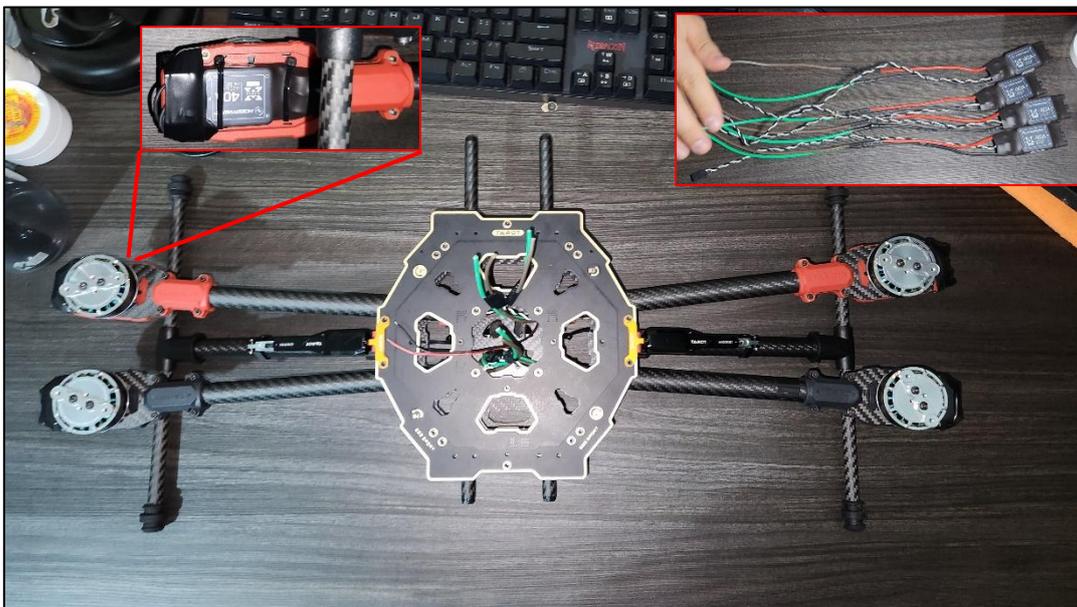


Nota. Elaboración propia

Para instalar los ESC se realizó el alargamiento de los cables de alimentación, puesto que el cable que venía por defecto era muy corto para poder conectarse con la placa de potencia, en la figura 46 se puede observar el lugar de su instalación (bajo los motores) y todos los cables listos para ya ser soldados a la placa de potencia y el cable de señal listo para ser conectado en la Pixhawk 6C.

Figura 46

Montaje de los ESC completa

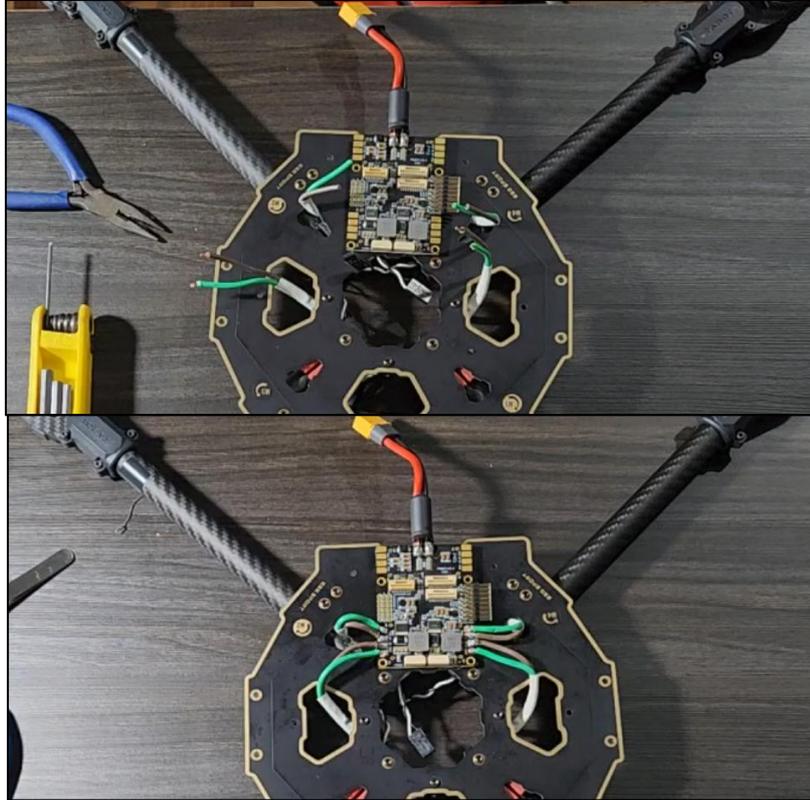


Nota. Elaboración propia

Se fijó la placa de potencia con cinta doble faz y se procedió a soldar los cables de los ESC en sus lugares correspondientes, como se muestra en la figura 47.

Figura 47

Montaje de placa de potencia y conexión de los ESC

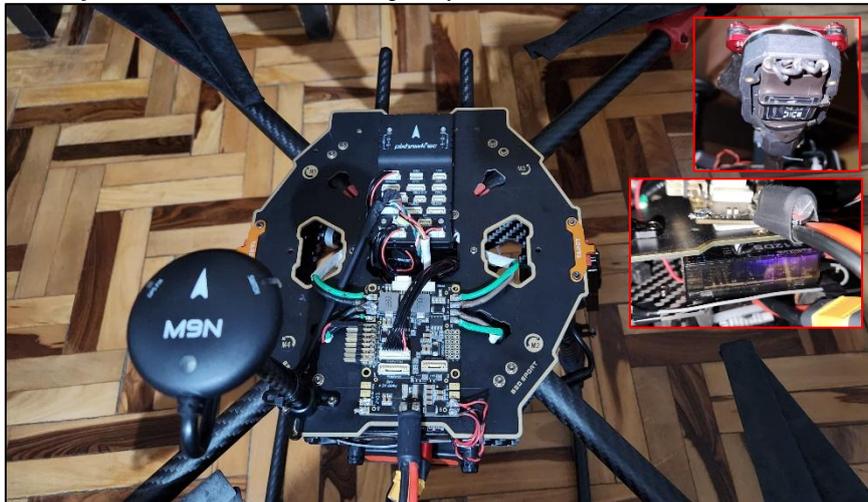


Nota. Elaboración propia

Finalmente se instaló la Pixhawk, el GPS, el receptor y se hicieron las debidas conexiones, además se conectaron los ESC con su respectivo motor, se puede observar en la figura 48.

Figura 48

Montaje Pixhawk 6C, GPS, receptor y debidas conexiones



Nota. Elaboración propia

Se ubicaron las propelas de acuerdo al sentido de giro y el UAV totalmente ensamblado se puede observar en la figura 49.

Figura 49

Montaje de UAV completo



Nota. Elaboración propia

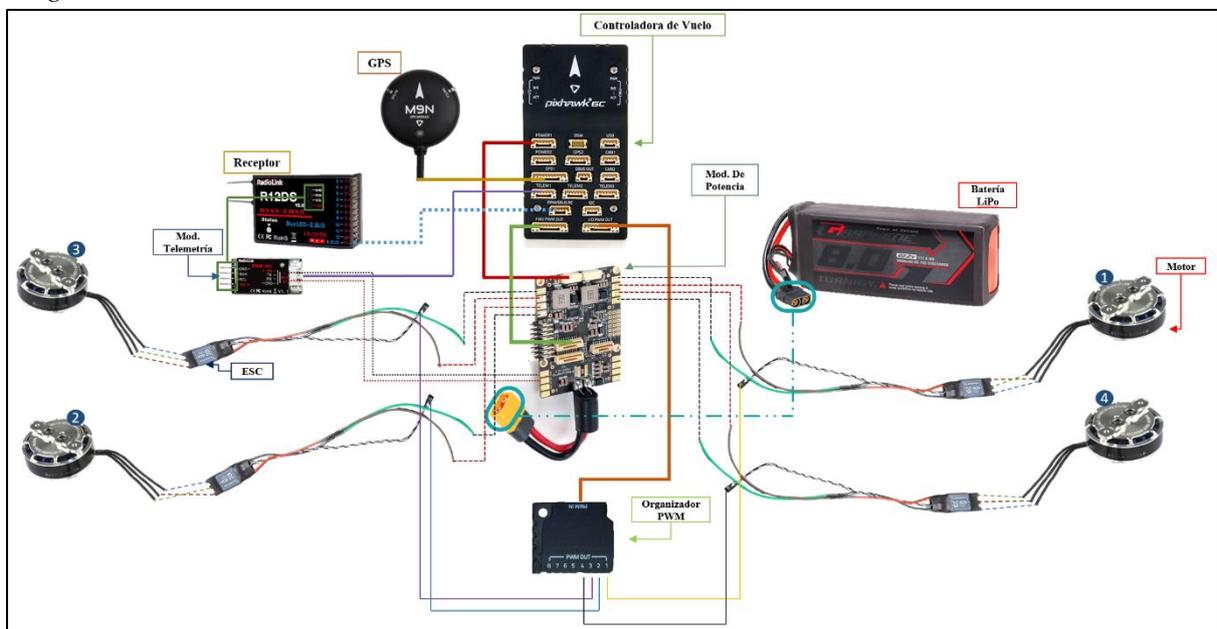
5.3.2. Diagrama de conexiones electrónicas

Mediante documentación de los componentes, foros y reviews en YouTube se pudo realizar un diagrama de conexiones, el mismo, permite explicar de forma adecuada todas las conexiones que se requirió hacer para la implementación completa del UAV. En la figura 50 se puede analizar cada punto de conexión, empezando por el módulo de alimentación (PM-07), el cual, es el que se interconecta con la batería por medio del conector XT90 y permitirá alimentar a los demás componentes. Mediante los cables que vienen incluidos en el kit que se adquirió, se conecta la controladora de vuelo (Pixhawk 6C) desde el puerto de power 1 del PM07 al puerto power 1 de la Pixhawk. Con esto ya se tiene energizada la controladora de vuelo, de manera consecuente, se interconecta los puertos FMU PWM del PM07 con el de la Pixhawk para que se comuniquen. Además, se hizo uso de un organizador para las señales PWM que van hacia los ESC, y este se conecta a la controladora de vuelo. Los ESC se sueldan directamente al módulo PM07, en este caso los cables marrones son los que irán en el polo positivo y los verdes al polo negativo, tal como se indica en el diagrama. Para la conexión de los motores, 2 de motores deben conectarse diferente al otro par, el 1 y 2 van conectados de la misma forma, variando un cable en su posición de conexión, por otro lado, el motor 3 y 4 van

conectados directamente sin ninguna variación, con la finalidad de que el motor 1 y 2 tengan un sentido de giro en contra de las manecillas del reloj (CCW) y el motor 3 y 4 giren en sentido de las manecillas del reloj (CW). Asimismo, se conecta el módulo GPS, que está integrado por un switch y un zumbador, al puerto GPS1 de la Pixhawk. El receptor se comunica con la Pixhawk a través del puerto SBUS RC, el mismo debe colocarse en modo SBUS para que se pueda comunicar de forma correcta con la Pixhawk e interprete las señales provenientes de la transmisora para el control del UAV. Finalmente, se conecta el módulo de telemetría tanto al receptor como a la Pixhawk, este enviará información interesante para la operabilidad del UAV en tiempo real.

Figura 50

Diagrama de conexiones electrónicas



Nota. Elaboración propia

5.3.3. Configuración del UAV

Para llevar a cabo la configuración de la Pixhawk se hizo uso del software Mission Planner de ArduPilot que está basado en código abierto, se descargó e instaló dicho software y una vez abierto se observa de la siguiente manera (figura 51).

Figura 51

Mission Planner 1.3.82

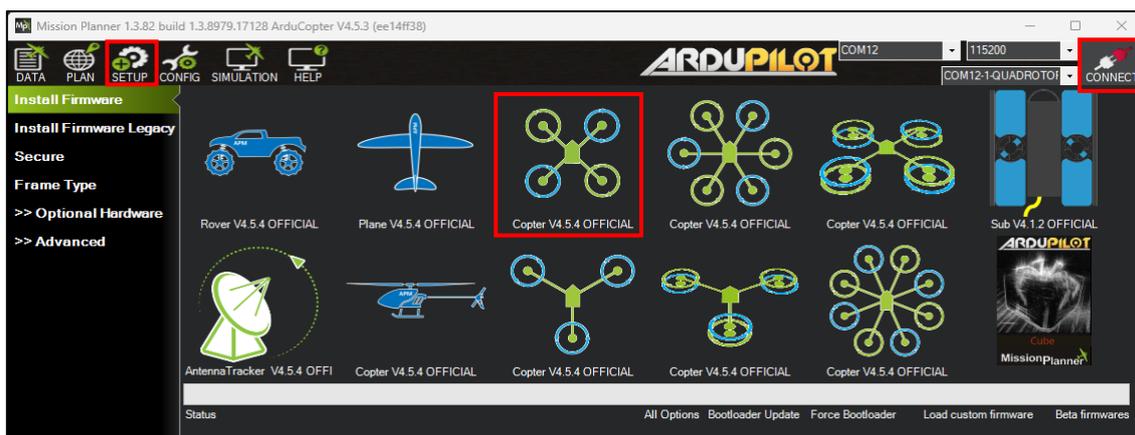


Nota. Elaboración propia

Como la Pixhawk tiene una entrada USB tipo C se procedió a conectarlo en la portátil y con ello la Pixhawk se encendió y se emitió un sonido al zumbador del GPS, se procedió entonces a seleccionar la opción “SETUP” donde aparece el menú que se observa en la figura 52. Dado que se construyó un UAV tipo cuadricopter se procedió a instalar el firmware correspondiente. Una vez instalado se ingresó a las opciones de la Pixhawk con la opción “Connect”.

Figura 52

Mission Planner 1.3.82

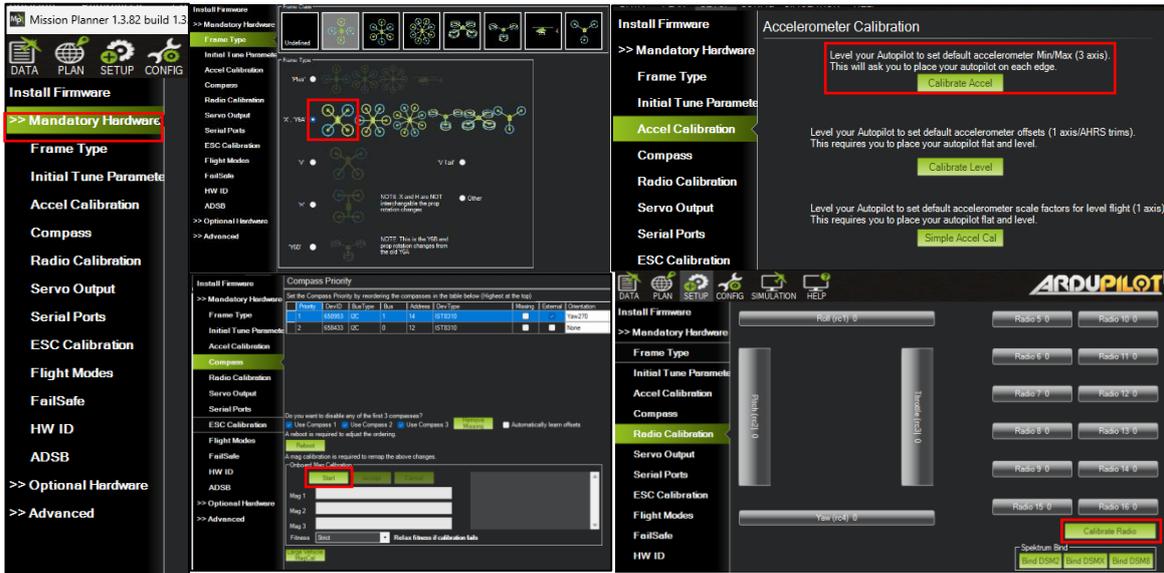


Nota. Elaboración propia

Dentro del mismo menú “SETUP” se desplegaron las opciones referentes a las configuraciones obligatorias que se realizaron para que el UAV esté operativo, por lo que, en la figura 53 se indican todas las configuraciones que se debió hacer.

Figura 53

Configuraciones obligatorias – Mission Planner



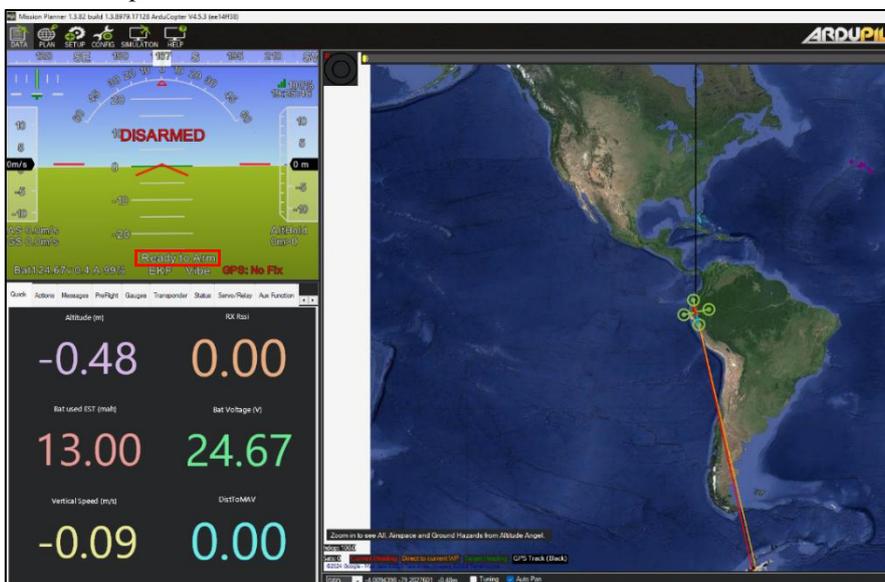
Nota. Elaboración propia

En el anexo 2 se presentan las configuraciones realizadas con mayor profundidad, además de la configuración de los modos de vuelo.

Una vez que se abordó con todas las configuraciones y su conexión con el transmisor el UAV está listo para volar, se procedió a conectar la batería y tras verificar que no existiera ningún error el software presentó un mensaje que estaba listo para “Armar”, lo cual es poder activar los motores con un mínimo de potencia para ya estar listo para el vuelo, esto se verifica en la figura 54.

Figura 54

UAV listo para “Armar”



Nota. Elaboración propia

5.3.4. Implementación de la red 4G LTE

En esta sección se presentará el proceso que se llevó a cabo para alcanzar una implementación exitosa de una arquitectura experimental 4G LTE. Se abarcan explicaciones referentes a la configuración de las tarjetas SIM/USIM, instalación de los controladores para el SDR y la instalación y configuración del software srsRAN 4G.

La implementación de la red LTE se llevó a cabo, de primera mano, en una máquina virtual, por lo que todas las subsecciones descritas a continuación se siguieron a cabalidad. Luego para la implementación en la Raspberry Pi 4, se omitió el paso de la instalación de PySIM, puesto que no era necesario, ya que, se tenía en la máquina virtual para la configuración de las tarjetas SIM.

5.3.4.1. Instalación de PySIM y configuración de la SIM

Como ya se había mencionado se requirió de tarjetas programables, es por esta razón que se hizo uso de PySIM para poder modificar ciertos parámetros que permitieron el registro exitoso del UE en la red LTE. Se debió modificar el MCC, MNC e IMSI de las tarjetas SIM que se usaron. Cabe destacar que para lograr la programación de las tarjetas se debe disponer de las claves ADM, que para este caso fueron proporcionadas por el fabricante al momento de ser adquiridas.

A continuación, se detallan los pasos que se siguieron para lograr la configuración de las tarjetas SIM.

1. Se procedió a abrir la terminal en Ubuntu y se instalaron las dependencias requeridas con el siguiente comando:

```
sudo apt-get install pcscd pcsc-tools libccid libpcsclite-dev python3-pyscard git
```

2. Se conectó el lector de tarjetas SIM a la portátil y se insertó una SIM programable, se procedió a verificar el estado de la conexión con el siguiente comando:

```
Pcsc_scan
```

Si el lector de tarjetas SIM fue reconocido de manera exitosa, en la terminal se desplegaba un mensaje “Card inserted”.

3. Una vez corroborada la conexión se realizó la descarga del código de PySIM junto con sus dependencias de instalación:

```
git clone https://github.com/osmocom/pysim
cd pysim
sudo apt-get install --no-install-recommends \
  pcscd libpcsclite-dev \
  python3 \
  python3-setuptools \
  python3-pycard \
  python3-pip
pip3 install -r requirements.txt
```

4. Seguidamente se ingresó al directorio de PySIM y se ejecutó el siguiente comando para verificar la configuración actual de la tarjeta SIM.

```
./pySim-read.py -p0
```

5. Para reconfigurar la SIM se debió introducir el siguiente comando y modificar en los parámetros dentro de < > ubicando los datos de las SIM:

```
./pySim-prog.py -p 0 -n <Nombre> -a <ADM-KEY> -s <ICCID> -i <IMSI> -x <MCC> -y <MNC> -k <KI> -o <OPC>
```

6. Por consiguiente, el comando completo y válido para la primera SIM usada fue el siguiente:

```
./pySim-prog.py -p 0 -n EmerUAV -a 89043232 -s 8988211000000722200 -i 901700000072220 -x 901 -y 70 -k 69A11D9D8F7FBFD7AAFA6DA98B6CF98E -o 0901F2ABDC631CC50FD16C02FC65FCD2
```

Para este caso se usaron estos valores para el MCC = 901 y para el MNC = 70.

Se realizó este mismo proceso para las demás tarjetas que se usaron, siempre teniendo en cuenta los valores correspondientes a esas tarjetas SIM, como la clave ADM, el ICCID, IMSI, MCC, MNC, KI y OPC.

5.3.4.2. *Instalación del controlador para el SDR BladeRF*

El funcionamiento del SDR implica controladores adecuados para el mismo, por lo que, se conectó el BladeRF a la portátil, se lo conectó a la máquina virtual y se realizó lo siguiente en una nueva ventana del terminal.

1. En primer lugar, se instalaron las dependencias necesarias:

```
sudo apt-get install libusb-1.0-0-dev libusb-1.0-0 build-essential cmake libncurses5-dev libtecla1 libtecla-dev pkg-config git wget
```

2. Se procedió con la descarga, compilación e instalación del controlador BladeRF:

```
git clone https://github.com/Nuand/bladeRF.git ./bladeRF
cd ./bladeRF
cd host/
mkdir build
cd build
cmake ../
make -j4
sudo make install
```

3. A través del siguiente comando se generaron los enlaces necesarios hacia las bibliotecas instaladas:

```
sudo ldconfig
```

4. Se procedió a la descarga del firmware correspondiente al BladeRF, con el siguiente comando:

```
sudo bladeRF-install-firmware
```

5. Finalmente se comprobó que el controlador estuviera instalado correctamente al detectar el BladeRF con el comando:

```
bladeRF-cli -p
```

Este proceso se completó tanto en la máquina virtual como en la Raspberry Pi 4, ya que de otro modo no se hubiera podido usar el SDR.

5.3.4.3. Instalación de srsRAN_4G

Este software se instaló en la máquina virtual Ubuntu 22.04 LTS y en la Raspberry Pi 4 sobre Ubuntu server 22.04 LTS, para lograr su instalación correcta se siguieron los pasos que se detallan en la documentación del manual de instalación de srsRAN_4G. A continuación, se describen cada uno de los pasos que se siguieron para obtener un funcionamiento adecuado de este software de arquitectura 4G LTE.

1. Primero, actualizó e instaló los paquetes de Ubuntu, luego se instaló las dependencias requeridas para srsRAN_4G:

```
sudo apt-get install build-essential cmake libfftw3-dev libmbedtls-dev libboost-program-options-dev libconfig++-dev libsctp-dev
```

2. Se clonó el repositorio de srsRAN_4G desde GitHub y se procedió a descargar:

```
git clone https://github.com/srsRAN/srsRAN_4G.git
cd srsRAN_4G
mkdir build
cd build
cmake ../
```

3. Para verificar si todo iba bien hasta ese momento, se procedió a abrir el archivo CMakeList.txt que se encontraba dentro de la carpeta srsRAN_4G y se corroboraron que las opciones de SRSENB y BLADERF estuvieran habilitadas:

```
option(ENABLE_SRSENB "Build srsENB application" ON)
option(ENABLE_BLADERF "Enable BladeRF" ON)
```

4. Otra comprobación necesaria que se hizo para saber que todo iba bien hasta el momento fue abrir el archivo CMakeCache.txt que se encontraba dentro de la carpeta

“build”, en este archivo de pudo observar la correcta detección de las ubicaciones de las librerías de los controladores del BladeRF, si esto se encontraba de forma correcta significaba que el dispositivo SDR iba a funcionar de forma correcta.

```
//Enable BladeRF
ENABLE_BLADERF:BOOL=ON
//Path to a file.
BLADERF_INCLUDE_DIRS:PATH=/usr/local/include
//Path to a library.
BLADERF_LIBRARIES:FILEPATH=/usr/local/lib/libbladeRF.so
```

5. Se continuó entonces con la compilación e instalación del software desde la carpeta “build”:

```
make
sudo make install
```

6. Se copió los archivos de configuración predeterminados y actualizar los enlaces de las librerías:

```
srsran_install_configs.sh user
sudo ldconfig
```

La ubicación de los archivos de configuración es importante tenerla en cuenta, ya que, será muy importante para las configuraciones que se debe realizar en el EPC, ENB y HSS, se puede encontrarla con el comando:

```
cd ~/.config/srsran
```

7. Este paso es importante realizarlo en la Raspberry Pi 4 para garantizar que el CPU se ejecute en modo rendimiento, se debe modificar el regulador de escala de la CPU Pi:

```
sudo systemctl disable ondemand
sudo apt install linux-tools-raspi

sudo nano /etc/default/cpufrequtils
* insert:
* GOVERNOR="performance"
```

8. Una vez ejecutado esos comandos se debe reiniciar la Raspberry Pi 4 y con el siguiente comando se verifica si ya se modificó el modo de la CPU:

```
sudo cpupower frequency-info
* should show that the CPU is running in performance mode, at maximum clock
speed
```

Al culminar estos pasos, el software se instaló correctamente con los parámetros de configuración predeterminados.

5.3.4.4. Configuración de la red 4G LTE

Son varios los archivos de configuración que incorpora srsRAN_4G, los mismos se encuentran en la ruta de: “~/config/srsran”. Los archivos son los siguientes:

```
enb.conf      epc.conf  rb.conf  sib.conf  user_db.csv
enb.conf.save mbms.conf rr.conf  ue.conf
```

Los archivos de configuración en los que se procedió a modificar algunos parámetros son 3 específicamente.

- srsEPC: “epc.conf”
- srseNB: “enb.conf”
- HSS: “user_db.csv”

- **epc.conf**

Este archivo de configuración se refiere al núcleo de la red, proporciona los componentes clave de EPC: Home Subscriber Service (HSS), Mobility Management Entity (MME), Service Gateway (S-GW) y Packet Data Network Gateway (P-GW) (srsRAN, 2024a).

Para ingresar a poder editar estos archivos, en primer lugar, se procedió a entrar a la ruta donde se encuentran, luego se ingresó al archivo con la siguiente línea de comando:

```
cd ~/config/srsran
sudo nano epc.conf
```

Las modificaciones que se realizaron son las siguientes:

```
[mme]
mme_code = 0x1a
mme_group = 0x0001
tac = 0x0007
mcc = 901
mnc = 70
mme_bind_addr = 127.0.1.100
apn = LTE
dns_addr = 8.8.8.8
encryption_algo = EEA0
integrity_algo = EIA1
paging_timer = 2
request_imeisv = false
lac = 0x0006
```

Los parámetros que se debieron modificar son el MCC (Mobile Country Code), MNC (Mobile Network Code) y el APN, los dos primeros deben ser igual a los que se configuró en las tarjetas SIM, en este caso 901 y 70 respectivamente, el APN servirá para que el UE pueda acceder a internet, esto se explicará más adelante, puesto que su configuración también se realizó en el UE.

- **enb.conf**

Este archivo contiene la configuración del programa srsENB, el cual es una estación base LTE eNB implementada en software. Se ejecuta como una aplicación y se conecta a la red EPC. Para transmitir y recibir señales de radio por aire se requiere de hardware SDR.

Cada parámetro que se encuentra en este archivo de configuración venía acompañado de un comentario, lo cual fue muy importante para entender fácilmente su función, es por eso que se describen a continuación algunos de los parámetros más importantes en este archivo de configuración y luego se muestra las modificaciones que se realizaron en el mismo.

- **enb_id:** Identificador en hexadecimal del eNB. Este valor es relevante en casos de handover, con el cual se corrobora la conexión del UE.
- **mcc y mnc:** Estos parámetros permiten configurar el Mobile Country Code (MCC) y Mobile Network Code (MNC) del eNB. La combinación de ambos define el operador que brinda el servicio. Para alinearse con los IMSI de las SIM, se utilizó 901-70 como MCC y MNC.
- **mme_addr:** Dirección IP de la interfaz S1-C en el servicio MME del núcleo.
- **gtp_bind_addr:** Es la IP de la interfaz de datos de usuario S1-U o la interfaz GTP en el eNB.
- **s1c_bind_addr:** IP de la interfaz de control S1-C o la interfaz S1-MME en el eNB.
- **n_prb:** Indica el número de Bloques de Recursos Físicos (PRB, Physical Resource Blocks), proporcional al ancho de banda, siendo un PRB equivalente a 0,2MHz. Los valores permitidos para 4G son 6 = 1.4MHz, 15 = 3MHz, 25 = 5MHz, 50 = 10MHz, 75 = 15MHz y 100 = 20MHz. Para el caso de la implementación en la Raspberry Pi 4 el máximo ancho de banda permitido fue de 3 MHz, puesto que al usar un mayor ancho de banda la conexión con el UE se vio afectada.
- **tm:** Se define el modo de transmisión (SISO, MIMO) del eNB. Hay cuatro opciones: una única antena, transmitir diversidad, CDD (Cyclic Delay Diversity) o multiplexado espacial de lazo cerrado. Enumerados del 1 – 4 respectivamente.
- **nof_ports:** Indica el número de puertos de transmisión, con 1 por defecto y 2 para los modos de transmisión 2, 3 y 4.
- **tx_gain:** Representa la ganancia de transmisión, en dBm. Define la potencia con la que el dispositivo SDR transmitirá.

- **rx_gain:** Corresponde a la ganancia en la recepción. Define la amplificación de la señal recibida antes del procesamiento. Si se omite, el AGC (Control Automático de Ganancia) se habilita, ajustándose en tiempo real según la potencia recibida.

Para ingresar a poder editar estos archivos, en primer lugar, se procedió a entrar a la ruta donde se encuentran, luego se ingresó al archivo con la siguiente línea de comando:

```
cd ~/.config/srsran
sudo nano enb.conf
```

Las modificaciones que se realizaron son las siguientes:

```
[enb]
enb_id = 0x19B
mcc = 901
mnc = 70
mme_addr = 127.0.1.100
gtp_bind_addr = 127.0.1.1
s1c_bind_addr = 127.0.1.1
s1c_bind_port = 0
n_prb = 15
tm = 4
nof_ports = 2

#####
[rf]
#dl_earfcn = 3350
dl_earfcn = 1934

tx_gain = 100
rx_gain = 100
```

Se modificó el MCC y MNC, como en el epc.conf. Además, se utilizó 15 RBs que proporcionan un ancho de banda de 3 MHz (configuración en la Raspberry Pi 4), ya que la documentación sugería eso, además se comprobó experimentalmente que con anchos de banda mayores no se lograba conectar al UE.

Por otro lado, se seleccionó el modo de transmisión de Multiplexado Espacial de Lazo Cerrado, el que corresponde al número 4 (por ende, el número de puertos de transmisión se colocó en 2) debido a que, este modo aprovecha al máximo las múltiples antenas en ambos extremos de la comunicación. El transmisor envía múltiples flujos de datos simultáneamente y el receptor utiliza algoritmos de procesamiento de señal para separar y decodificar estos flujos, lo que se traduce en mayor capacidad del sistema, al permitir transmitir más datos en el mismo ancho de banda.

Con respecto a la banda de frecuencia utilizada, se optó por trabajar con un dl_EARFCN = 1934, el cual seteó las siguientes frecuencias en el DL y UL, 1878,4 MHz y

1783,4 MHz respectivamente. Se utilizó esta banda porque la documentación lo sugería para que existiera mejor conectividad con los UEs mientras se estaba trabajando sobre la Raspberry Pi 4.

Finalmente, la ganancia en la transmisión se configuró al 100 así como en la ganancia de la recepción, con el objetivo de tener la máxima distancia en la cobertura.

- **user_db.csv**

En el siguiente archivo se deben agregar algunos parámetros de los usuarios para que la red central EPC pueda tener registro de ello y al momento de conectarlos al eNB se dé una conexión exitosa.

Se ingresó a la ubicación del archivo y luego se ingresó para modificarlo:

```
cd ~/.config/srsran
sudo nano user_db.csv
```

Una vez dentro del archivo se puede observar la composición del mismo:

```
# .csv to store UE's information in HSS
# Kept in the following format:
"Name,Auth,IMSI,Key,OP_Type,OP/OPc,AMF,SNQ,QCI,IP_alloc"
#
# Name:      Human readable name to help distinguish UE's. Ignored by the HSS
# Auth:      Authentication algorithm used by the UE. Valid algorithms are XOR
#            (xor) and MILENAGE (mil)
# IMSI:      UE's IMSI value
# Key:       UE's key, where other keys are derived from. Stored in hexadecimal
# OP_Type:   Operator's code type, either OP or OPc
# OP/OPc:    Operator Code/Cyphered Operator Code, stored in hexadecimal
# AMF:       Authentication management field, stored in hexadecimal
# SNQ:       UE's Sequence number for freshness of the authentication
# QCI:       QoS Class Identifier for the UE's default bearer.
# IP_alloc:  IP allocation strategy for the SPGW.
#            With 'dynamic' the SPGW will automatically allocate IPs
#            With a valid IPv4 (e.g. '172.16.0.2') the UE will have a statically
#            assigned IP.
#
# Note: Lines starting by '#' are ignored and will be overwritten
ue1,mil,90170000072220,69a11d9d8f7bfd7aafa6da98b6cf98e,opc,0901f2abdc631cc50fd1
6c02fc65fcd2,9000,000000008d3a,9,dynamic

ue2,mil,90170000072224,cc09f06d3a6d190aa67d965a0e8f0211,opc,6f60ab0e93ab038c9753
67f88e1e6ffc,9000,0000000014a,9,dynamic
```

Como se puede observar se tienen agregados 2 SIM, para 2 UE, el formato de la línea de comando se compone de los siguientes elementos:

```
(ue_name),(algo),(imsi),(K),(OP/OPc_type),(OP/OPc_value),(AMF),(SNQ),(QCI),(IP_al
loc)
```

Todos los parámetros se colocaron de acuerdo a las SIM programadas, para los 4 últimos valores se puede usar lo siguiente: 9000, 000000000000, 9, dynamic

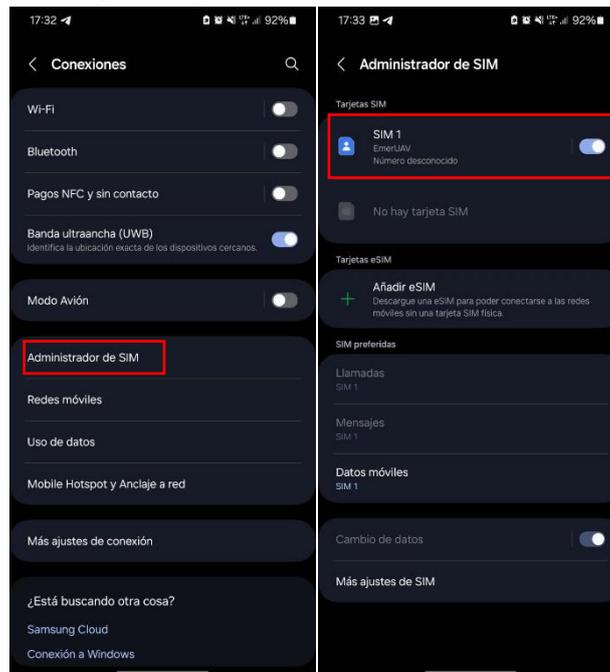
Para guardar la configuración de estos tres archivos modificados se presionó Ctrl + S y para salir Ctrl + X. Con eso quedaron guardados los parámetros modificados.

5.3.4.5. Configuración de los UEs

Para lograr una conexión exitosa del UE se procedió a crear un APN en el dispositivo móvil luego de haber insertado la tarjeta SIM y haberla habilitado. Este proceso se realizó en el dispositivo del usuario, se siguieron los pasos que se observan a continuación.

Figura 55

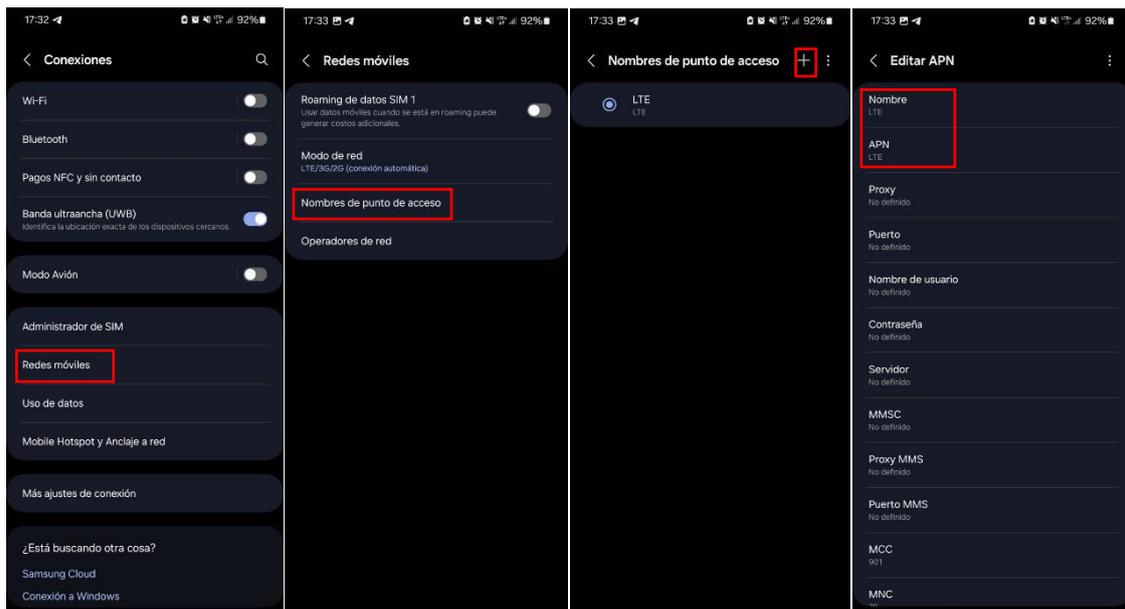
Se comprueba que se ha leído la SIM



Nota. Elaboración propia

Figura 56

Creación del APN en Equipo de Usuario (UE)



Nota. Elaboración propia

5.3.4.6. *Ejecución de la red 4G LTE*

Es importante mencionar que para fines prácticos se consideró como red de Backhaul a una conexión de WiFi o Ethernet en la Raspberry Pi 4 para lograr tener acceso a internet.

Para ejecutar la red de forma correcta siempre que se requiera se debe seguir el siguiente proceso:

- Verificar la conexión a internet a través de una red de WiFi.
- Ejecutar el script de enmascaramiento a la interfaz de salida.
- Ejecutar el núcleo de la red (EPC)
- Ejecutar el eNB

Se procederá a explicar cada uno de los puntos mencionado.

- **Conexión a WiFi**

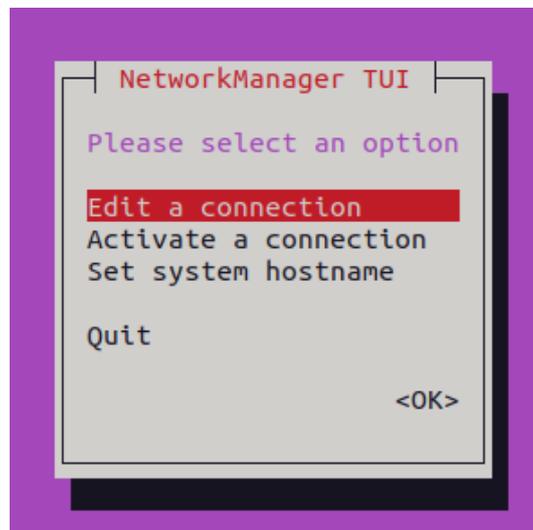
En Ubuntu de la máquina virtual es muy fácil su verificación, sin embargo, en Ubuntu Server de la Raspberry Pi 4 se complica un poco, es por eso que a continuación se muestra una forma rápida de conectarse a una red WiFi.

Se ejecuta el siguiente comando, el cual desplegará un menú muy amigable para poder realizar la conexión a una red WiFi, como se muestra en la figura 57.

```
nmtui
```

Figura 57

Conexión a red WiFi



Nota. Elaboración propia

En ese menú se selecciona “Activate a connection”, hará que se despliegue un menú donde se encuentran las redes WiFi disponibles, se debe seleccionar la que se desea e introducir

la contraseña, luego de haberse conectado se procede a abandonar dicho menú presionando Escape.

- **Script de enmascaramiento a la interfaz de salida**

Este proceso habilita el reenvío IP y configura la traducción de direcciones de red para pasar el tráfico entre la red 4G LTE y la red externa. Se debe ejecutar cada vez que se reinicia el hardware, de otra manera no tendrá conexión a internet el UE.

Para llevar a cabo este proceso se debe ubicar en la carpeta que contiene el script de enmascaramiento, el mismo se ubica en “*srsRAN_4G/srsepc*”.

Se ejecuta el comando “route” en la terminal para verificar la interfaz asociada con el destino predeterminado.

Destination	Gateway	Genmask	Flags	Metric	Ref	Use	Iface
default	_gateway	0.0.0.0	UG	100	0	0	ens33
link-local	0.0.0.0	255.255.0.0	U	1000	0	0	ens33
192.168.81.0	0.0.0.0	255.255.255.0	U	100	0	0	ens33

En este caso la interfaz “ens33” es la que está asociada con el destino, por ende, el comando para ejecutar el script fue el siguiente:

```
sudo ./srsepc_if_masq.sh <interface>
```

```
sudo ./srsepc_if_masq.sh ens33
```

Y se recibirá un mensaje en la terminal indicando lo siguiente:

“Masquerading Interface ens33”

- **Ejecutar el núcleo de la red (EPC)**

Para este punto ya se está cerca de tener levantada y operativa la red, para ejecutar el EPC se debe dirigir a la ubicación de los archivos de configuración y ejecutar el siguiente comando:

```
sudo srsepc epc.conf
```

En la terminal aparecerá lo siguiente:

```
Built in Release mode using commit ec29b0c1f on branch master.

--- Software Radio Systems EPC ---

Reading configuration file epc.conf...
HSS Initialized.
MME S11 Initialized
MME GTP-C Initialized
MME Initialized. MCC: 0xf901, MNC: 0xff70
SPGW GTP-U Initialized.
SPGW S11 Initialized.
SP-GW Initialized.
```

Eso corrobora que el EPC se ha levantado con éxito.

- **Ejecutar el eNB**

Finalmente se ejecuta el eNB en una nueva ventana del terminal, se utiliza la siguiente

línea de comando:

```
sudo srsenb enb.conf
```

Una vez ejecutado, se mostrará lo siguiente:

```
Active RF plugins: libsrsran_rf_blade.so
Inactive RF plugins:
--- Software Radio Systems LTE eNodeB ---

Reading configuration file enb.conf...

Built in Release mode using commit ec29b0c1f on branch master.

/home/vicente/srsRAN_4G/srsenb/src/enb_cfg_parser.cc:1881: Force DL EARFCN for
cell PCI=1 to 1934
Opening 2 channels in RF device=bladeRF with args=default
Supported RF device list: bladeRF file
Opening bladeRF...
Set RX sampling rate 1.92 Mhz, filter BW: 1.92 Mhz

==== eNodeB started ====
Type <t> to view trace
Set RX sampling rate 3.84 Mhz, filter BW: 3.07 Mhz
Setting frequency: DL=1878.4 Mhz, UL=1783.4 MHz for cc_idx=0 nof_prb=15
set TX frequency to 1878399998
set TX frequency to 1878399998
set RX frequency to 1783399998
set RX frequency to 1783399998
```

Indica información con respecto a la banda en la que transmitirá, el ancho de banda usado, los RBs, el número de canales que transmitirá y las frecuencias de DL y UL.

Por otro lado, la terminal donde se está ejecutando el EPC mostrará mensajes de conexión con el eNB que se acaba de levantar, como se observa a continuación:

```
Received S1 Setup Request.
S1 Setup Request - eNB Name: srsenb01, eNB id: 0x19b
S1 Setup Request - MCC:901, MNC:70
S1 Setup Request - TAC 7, B-PLMN 0x9f107
S1 Setup Request - Paging DRX v128
Sending S1 Setup Response
```

La conexión del UE también es reportada por el EPC y se muestra de la siguiente manera en la ventana del terminal, indica la IMSI, la dirección IP que se le ha asignado, su autenticación, seguridad y demás:

```
Initial UE message: NAS Message Type Unknown
Received Initial UE message -- Service Request
Service request -- S-TMSI 0x551b9855
Service request -- eNB UE S1AP Id 1
Could not find IMSI from M-TMSI. M-TMSI 0x551b9855
Initial UE message: LIBLTE_MME_MSG_TYPE_ATTACH_REQUEST
Received Initial UE message -- Attach Request
Attach request -- M-TMSI: 0x551b9855
```

```

Attach request -- eNB-UE S1AP Id: 2
Attach request -- Attach type: 2
Attach Request -- UE Network Capabilities EEA: 11110000
Attach Request -- UE Network Capabilities EIA: 01110000
Attach Request -- MS Network Capabilities Present: true
PDN Connectivity Request -- EPS Bearer Identity requested: 0
PDN Connectivity Request -- Procedure Transaction Id: 58
PDN Connectivity Request -- ESM Information Transfer requested: true
UL NAS: Received Identity Response
ID Response -- IMSI: 90170000072220
Downlink NAS: Sent Authentication Request
UL NAS: Received Authentication Response
Authentication Response -- IMSI 90170000072220
UE Authentication Accepted.
Generating KeNB with UL NAS COUNT: 0
Downlink NAS: Sending NAS Security Mode Command.
UL NAS: Received Security Mode Complete
Security Mode Command Complete -- IMSI: 90170000072220
Sending ESM information request
UL NAS: Received ESM Information Response
ESM Info: APN LTE
Getting subscription information -- QCI 9
Sending Create Session Request.
Creating Session Response -- IMSI: 90170000072220
Creating Session Response -- MME control TEID: 1
Received GTP-C PDU. Message type: GTPC_MSG_TYPE_CREATE_SESSION_REQUEST
SPGW: Allocated Ctrl TEID 1
SPGW: Allocated User TEID 1
SPGW: Allocate UE IP 172.16.0.2
Received Create Session Response
Create Session Response -- SPGW control TEID 1
Create Session Response -- SPGW S1-U Address: 127.0.1.100
SPGW Allocated IP 172.16.0.2 to IMSI 90170000072220
Adding attach accept to Initial Context Setup Request
Sent Initial Context Setup Request. E-RAB id 5
Received Initial Context Setup Response
E-RAB Context Setup. E-RAB id 5
E-RAB Context -- eNB TEID 0x1; eNB GTP-U Address 127.0.1.1
UL NAS: Received Attach Complete

```

La terminal del eNB también indicará información con respecto al UE conectado:

-----DL-----										-----UL-----								
rat	pci	rnti	cqi	ri	mcs	brate	ok	nok	(%)	pusch	pucch	phr	mcs	brate	ok	nok	(%)	bsr
lte	1	47	15	1	0	0	0	0	0%	n/a	99.9	0	0	0	0	0	0%	0.0
RF status: 0=2, U=0, L=0																		
lte	1	47	15	1	26	1.1M	76	1	1%	16.3	13.2	40	17	7.8k	2	0	0%	0.0
lte	1	47	15	1	0	0	0	0	0%	n/a	99.9	0	0	0	0	0	0%	0.0
lte	1	47	15	1	0	0	0	0	0%	n/a	99.9	0	0	0	0	0	0%	0.0
lte	1	47	15	1	0	0	0	0	0%	n/a	99.9	0	0	0	0	0	0%	0.0
lte	1	47	15	1	5	1.9k	6	0	0%	16.6	13.7	40	17	19k	5	0	0%	0.0
RF status: 0=7, U=0, L=0																		
lte	1	47	15	1	10	9.6k	2	0	0%	16.4	13.8	40	17	3.9k	1	0	0%	0.0
RF status: 0=10, U=0, L=0																		
lte	1	47	13	1	0	0	0	0	0%	n/a	99.9	0	0	0	0	0	0%	0.0
lte	1	47	15	1	0	0	0	0	0%	n/a	99.9	0	0	0	0	0	0%	0.0
lte	1	47	15	1	0	0	0	0	0%	n/a	99.9	0	0	0	0	0	0%	0.0

Se puede observar parámetros como el CQI, MCS, BRate, los cuales indican la calidad de conexión, codificación de modulación y las tasas de transferencia usadas en ese momento por el UE, estos datos se muestran con forme a los UEs conectados al nodo LTE.

Los archivos de configuración completos se encontrarán en la sección de anexos.

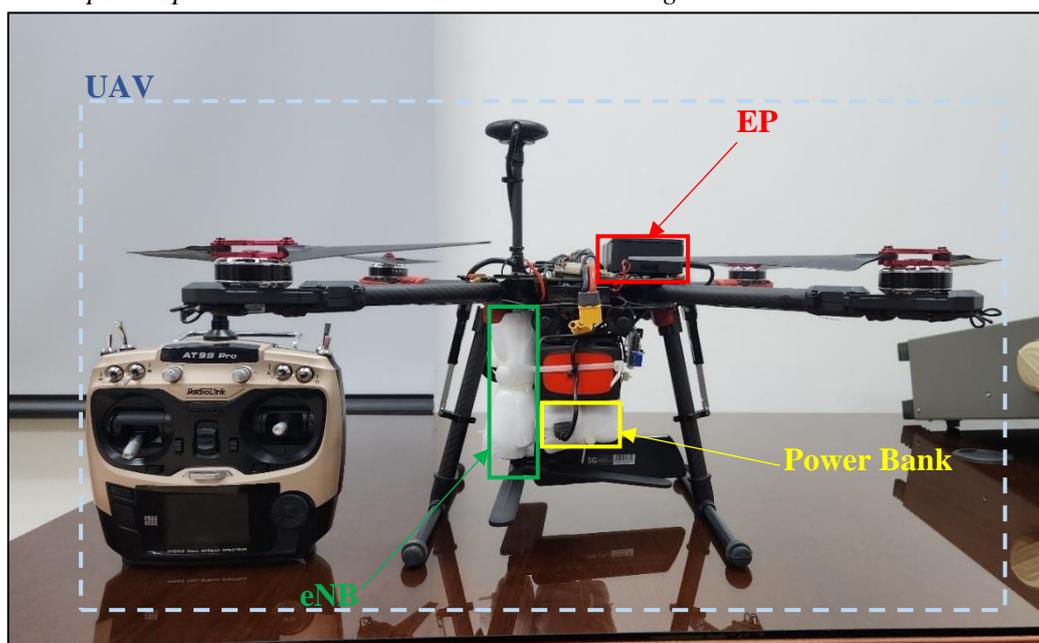
5.3.4.7. *Prototipo completo*

En esta pequeña sección se mostrará el ensamble y unificación de los dos sistemas implementados, por un lado, el UAV y por otro la red LTE totalmente operativa. Se procedió al montaje del eNB en un lugar ideal del UAV, asimismo se colocó la Raspberry Pi 4 en un lugar donde no se interfiera con la operatividad normal del UAV y para su alimentación se colocó un Power Bank, el cual suministraba la suficiente energía para levantar el eNB y mantenerlo activo durante todo el tiempo que durara la batería del power bank, la cual no era nada corta, pues tenía 20000 mAh. Asimismo, el SDR se lo ubicó a un costado del UAV con el fin de poder desplegar sus antenas de forma correcta y apropiada para la propagación de la señal móvil.

En la figura 58 se puede observar el UAV con la estación móvil completamente acoplada y lista para sus pruebas.

Figura 58

Prototipo completo – Sistema de comunicación de emergencia



Nota. Elaboración propia

5.4. Metodología de pruebas de rendimiento

Evaluar el rendimiento es fundamental para un sistema de esta índole, es por eso que para este proceso se ha empleado diversas aplicaciones móviles y web, como por ejemplo el medidor de velocidad Speedtest de Ookla, el cual permite medir la capacidad de DL y UL de la red LTE levantada. Asimismo, se usó la aplicación denominada Network Cell Info Lite para poder realizar mediciones con respecto a la recepción y calidad de la señal LTE.

Se pudo evaluar la red con un analizador de espectro, el cual es un equipo certificado, se analizó el cambio que sufre el ancho de banda cuando se está haciendo uso de la red LTE. Asimismo, se comprobó la distancia de cobertura manteniendo el eNB de forma estática y en vuelo.

Por otro lado, se pudo evaluar la autonomía del propiamente del UAV, y analizar su comportamiento con el peso extra que supone agregar más carga con respecto a la estación móvil y su operatividad.

Se analizó la conectividad cuando más de un UE se conectaba a la red y se realizaron pruebas de desconexión para observar el tiempo que tardaba en reconectarse a la red, de igual manera se usaron los datos de la conexión para realizar llamadas de voz, videollamadas a través de la aplicación de WhatsApp y para observar contenido en vivo en plataformas como YouTube y twitch.

6. Resultados

En la presente sección se exponen los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con el prototipo de comunicación móvil de emergencia utilizando un UAV. Ha sido evaluado bajo diversos parámetros para corroborar su funcionalidad, operatividad, eficiencia y autonomía lo que permitirá obtener un criterio de calidad del prototipo. Se presentan las herramientas de software que sirvieron para analizar el estado y cualidades técnicas de la red LTE.

Las pruebas se desarrollaron principalmente dentro de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables, tanto dentro del Laboratorio de Antenas y Telecomunicaciones, así como en el campus de dicha facultad.

Como bien se ha mencionado anteriormente, este trabajo de integración curricular es la unificación de dos sistemas, por un lado, el UAV implementado desde cero y la implementación de la red LTE usando un hardware de procesamiento de bajos recursos. Por esta razón se consideró conveniente, en primera instancia, evaluar el funcionamiento de los sistemas por separado, con el objetivo de tener una visión amplia del prototipo en cuestión y establecer puntos de comparación cuando se unifiquen ambos sistemas.

6.1. Pruebas de funcionamiento del UAV

Estas pruebas abarcan la operatividad, autonomía y respuesta de los sistemas (principalmente de Pixhawk) a bordo.

6.1.1. Operatividad

El UAV tiene la posibilidad de ser configurado para responder a distintos modos de vuelo, los cuales se mencionan a continuación:

- **Modo de vuelo manual o Stabilize:** No tiene ninguna ayuda de los sistemas a bordo, el operador es el responsable de todas las maniobras del UAV.
- **Modo de vuelo Alt Hold:** El operador lleva a cierta altitud el UAV y este se encarga de mantener su altitud utilizando sus sensores (Barómetro, GPS, etc) para ajustar su posición vertical de forma autónoma, pero el operador debe estar pendiente de su ajuste horizontal.
- **Modo de vuelo Loiter:** El operador posiciona el UAV tanto horizontal como vertical y el UAV de forma automática ajusta esa posición utilizando su GPS.
- **Modo de vuelo Auto:** El operador traza una misión, es decir añade puntos de interés (WP) en un mapa de forma manual previa al vuelo y cuando arma el UAV y procede a seleccionar este modo de vuelo el UAV se encargará de realizar el plan de vuelo,

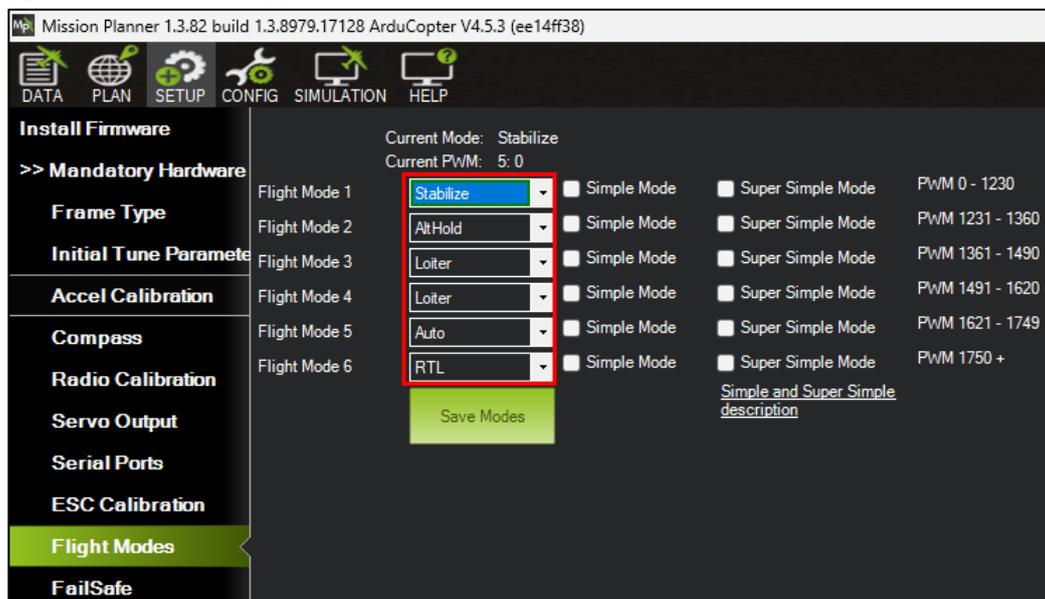
previamente cargado en su controlador de vuelo, de forma autónoma, abarcando cada WP usando el GPS.

Al evaluar cada modo de vuelo se pudo constatar que el modo de vuelo que ofrece mejor operatividad es el modo “Loiter” y si se crea una misión de vuelo previamente se puede usar tranquilamente el modo “Auto”. Esto no quiere decir que los otros modos de vuelo no sirvan, sin embargo, se tiene un mayor control del UAV con los modos de vuelo donde se use el GPS como sistema de ayuda para su posicionamiento.

En la figura 59 se pueden observar los modos de vuelo configurados en Mission Planner.

Figura 59

Modos de vuelo del UAV



Nota. Elaboración propia

Para corroborar el uso de los modos de vuelo que han adquirido gran relevancia en la operatividad del UAV, se procedió a crear un repositorio en Github y se añadieron los links de los videos hacia la plataforma de YouTube, la cual tiene el siguiente enlace para su ingreso: https://github.com/Vichearias10/Evidencia_Pruebas-Prototipo-UAV_eNB/blob/main/README.md

6.1.2. Autonomía

Este parámetro es muy importante y luego de varios vuelos de máximo 50 metros de altitud con respecto a la superficie de despegue, el total del peso del UAV fue de 2,5 Kg y se pudo determinar una autonomía alrededor de 28 – 30 minutos en condiciones favorables con respecto a variables ambientales. Cabe destacar que en este parámetro influyen muchos

factores, por ejemplo, la altitud con respecto al nivel del mar, la intensidad del viento, el peso del UAV, el tipo de las hélices, altitud de vuelo, consumo energético de componentes y calibración de sistemas.

6.1.3. Respuesta de los sistemas

Durante cada vuelo experimental se podía identificar con satisfacción que las calibraciones del UAV fueron exitosas, ya que reaccionaba correctamente a los controles del transmisor, de manera rápida, totalmente imperceptible el delay y la estabilidad en el aire demostraba que la elección de sus componentes fueron los correctos. En la figura 60 se observa el UAV en funcionamiento.

Figura 60

UAV en funcionamiento



Nota. Elaboración propia

6.2. Pruebas a la estación móvil LTE

La red 4G LTE implementada en la Raspberry Pi 4 se pudo evaluar, de primera mano, en un ambiente estático, es decir sin poner en marcha aún el UAV. Los resultados que se

obtuvieron se muestran a continuación, se dividirán en rendimiento de la red, potencia de recepción, test de velocidad de DL y UL, distancia máxima de cobertura y análisis del espectro.

6.2.1. Rendimiento de red LTE

Para esta prueba se procedió a conectar dos UEs al eNB y los dos realizaron uso de la red de datos de forma normal, navegar por internet, usar redes sociales, mirar contenido en tiempo real y el rendimiento de la red fue excelente. La figura 61 presenta dichas pruebas.

Figura 61

Pruebas de rendimiento – Navegación por internet – Contenidos en vivo



Nota. Elaboración propia

Asimismo, se pudo constatar la velocidad que estos dos UEs estaban ocupando al momento de estar usando la red de datos, en la figura 62 se observa claramente las tasas de transferencia consumidas por los UEs conectados simultáneamente.

Figura 62

Tasas del DL consumidas por dos UEs

```

RF status: 0=9, U=0, L=0
lte 1 234 15 1 26 8.9M 939 44 4% | 12.9 15.9 29 9 413k 281 19 6% 0.0
RACH: tti=8611, cc=0, pci=1, preamble=6, offset=31, temp_crnti=0x264
RRCReestablishmentReject for rnti=0x264. Cause: no context available
Disconnecting rnti=0x264.
RACH: tti=8701, cc=0, pci=1, preamble=15, offset=31, temp_crnti=0x265
User 0x265 connected
RF status: 0=3, U=0, L=0
lte 1 265 15 1 27 21k 15 19 55% | 13.0 15.9 40 9 21k 22 7 24% 0.0
RF status: 0=17, U=0, L=0
lte 1 234 15 1 3 7.4M 734 6 0% | 5.2 7.1 29 3 454k 308 4 1% 0.0
lte 1 265 15 1 26 1.1M 133 61 31% | 14.0 15.5 37 11 46k 87 9 9% 0.0
RF status: 0=4, U=0, L=0
lte 1 234 14 1 23 7.4M 784 42 5% | 6.2 9.0 31 2 471k 347 22 5% 0.0
lte 1 265 15 1 27 225k 35 12 25% | 15.3 15.6 37 11 38k 72 12 14% 0.0
RF status: 0=3, U=0, L=0
lte 1 234 15 1 22 6.6M 667 8 1% | 5.6 8.7 29 2 364k 265 13 4% 0.0

```

rat	pci	rnti	cqi	ri	mcs	brs	ok	nok	(%)	pusch	pucch	phr	mcs	brs	ok	nok	(%)	bsf
lte	1	265	15	1	27	56	1	0	0%	12.8	15.7	40	9	1.9k	1	0	0%	0.0
lte	1	234	15	1	1	8.5M	803	4	0%	8.3	4.5	29	9	502k	314	2	0%	0.0
lte	1	265	15	1	26	1.5M	175	149	45%	13.3	15.3	40	10	26k	62	5	7%	0.0
lte	1	234	15	1	22	6.1M	709	39	5%	4.7	5.1	32	1	453k	357	21	5%	0.0
lte	1	265	15	1	26	5.6k	10	48	82%	13.4	15.8	40	10	58k	150	38	20%	0.0
lte	1	234	15	1	8	6.8M	745	61	7%	3.5	2.7	39	1	476k	381	37	8%	0.0

Nota. Elaboración propia

Adicionalmente se comprobó el rendimiento de la red por medio de llamadas de voz a través de la aplicación de WhatsApp, donde la red LTE permitió una comunicación de voz limpia y fluida, además se pudo realizar con tranquilidad y normalidad videollamadas desde la misma aplicación y la experiencia de usuario fue muy buena. En la figura 63 se observa una llamada efectuada y se comprueba la conexión a la red LTE, porque se mantuvo abierta la aplicación Network Cell Info Lite la cual indica el nombre que se le asignó al SIM.

Figura 63

Llamada de WhatsApp



Nota. Elaboración propia

6.2.2. Potencia de recepción y cobertura

Para la ejecución de esta prueba se necesitó de la aplicación denominada Network Cell Info Lite instalada en el UE conectado a la red. Esta aplicación proporciona herramientas de

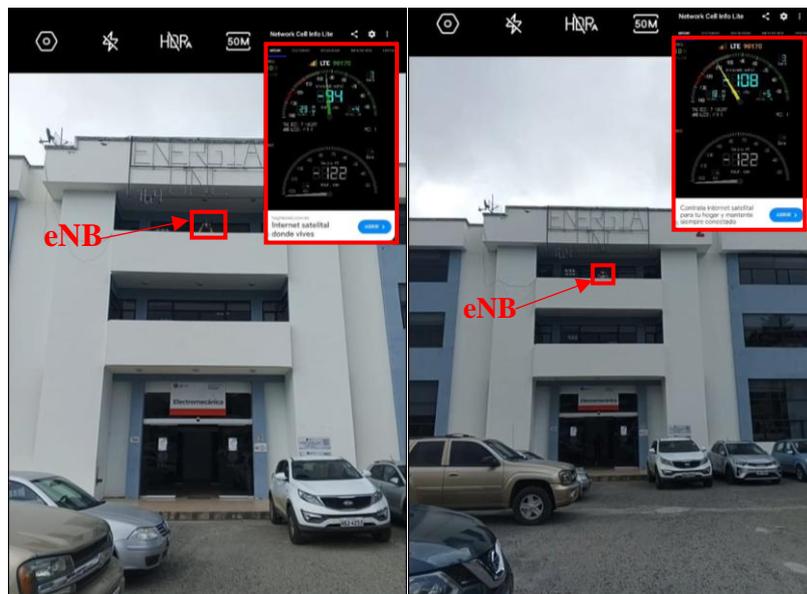
medición de la recepción de la señal LTE, así como del RSSNR, el RSRQ y adicionalmente indica la banda usada.

Estas pruebas se basaron en que la estación LTE se encontraba fija en cierto lugar y el UE comenzó a alejarse para ir corroborando el nivel de conectividad. Se realizaron en los siguientes escenarios:

- **eNB LTE ubicado en el balcón del Laboratorio de Antenas y Telecomunicaciones:** El UE se mantenía conectado sin dificultad, incluso hasta tenía buena recepción de señal, la distancia inicial de forma diagonal desde el UE al eNB fue de 14 m y la distancia final fue de 24 m. Como se observa en la figura 64 se tiene buena recepción de señal LTE a esas distancias.

Figura 64

Nivel de recepción a 14 m y 24 m del eNB



Nota. Elaboración propia

- **eNB LTE a nivel de la superficie en dirección al estacionamiento de la facultad de la energía:** En esta prueba se tomaron mediciones cada 2 metros, luego cada 5 metros, hasta llegar al punto más lejano en donde la intensidad de señal era mala. Los resultados de la misma se presentan en la tabla 15.

Tabla 15. Mediciones de recepción de señal – Cobertura

Distancia (m)	0	2	4	6	8	10	15	20	25	40	56	85	146
RSRP (dBm)	-78	-89	-94	-94	-99	-101	-109	-105	-109	-112	-118	-126	-130
RSSNR dB	24	23	21	20	18	16	15	15	11	5	3	-3	-5

Nota. Elaboración propia

6.2.3. Test de velocidad Mbps

En estas pruebas se obtuvo la capacidad de DL y UL de la red implementada, permitiendo observar la velocidad máxima a la que permite el ancho de banda del canal.

La figura 65 muestra un test realizado en Speedtest de Ookla con un smartphone Samsung Galaxy s22+ a 1 metro de distancia del eNB, en esta prueba se pueden observar las velocidades máximas que llega a entregar la red LTE con un backhaul WiFi de grandes capacidades.

Figura 65

Test de velocidad



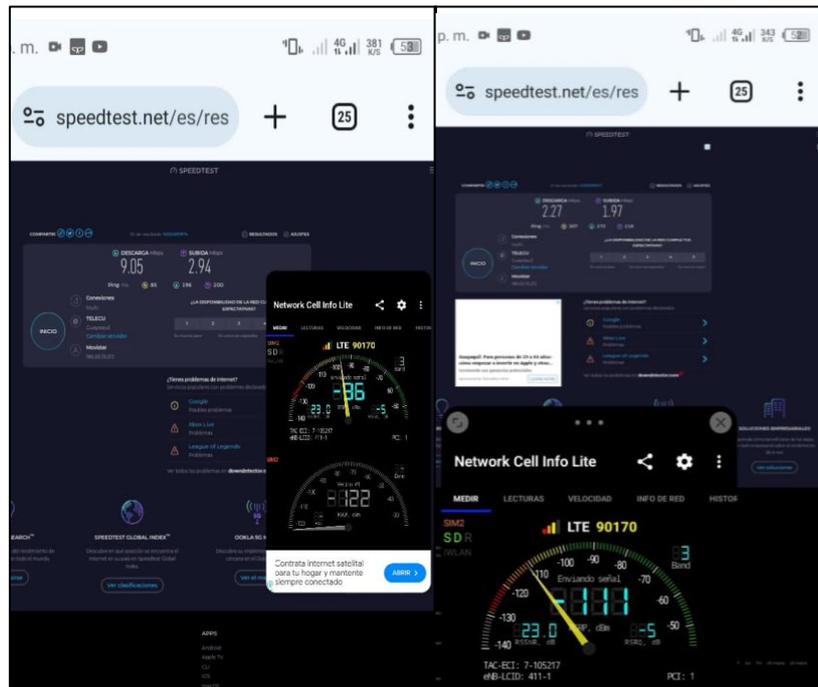
Nota. Elaboración propia

Para el caso anterior, lo que se muestra en la figura 64, también se procedió a realizar un test en cada una de esas distancias y resultó en lo siguiente que se observa en la figura 66.

Se nota una caída en las velocidades, esto se debe a que la señal ya no se recibe con la misma intensidad a esa distancia, sin embargo, hay conexión y se pudo acceder a navegar por internet. Estas pruebas se realizaron en un smartphone Tecno Pova 4.

Figura 66

Test de velocidad



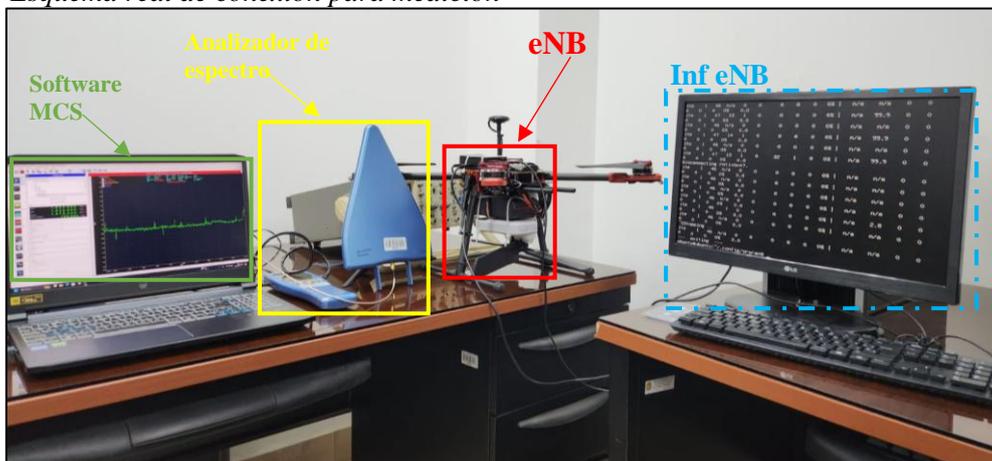
Nota. Elaboración propia

6.2.4. Análisis de espectro de frecuencia

Para un análisis adecuado de la banda de frecuencia en la que operaba la red LTE se creyó necesario usar un equipo certificado para el análisis del espectro, el cual fue el analizador de espectro HF-6065 de Aaronia con antena Hyperlog 7060 y el software MCS Spectrum Analyzer que cuenta el Laboratorio de Antenas y Telecomunicaciones. Es por eso que se pudo realizar las mediciones y análisis del espectro siguiendo el esquema que se presenta en la figura 67.

Figura 67

Esquema real de conexión para medición

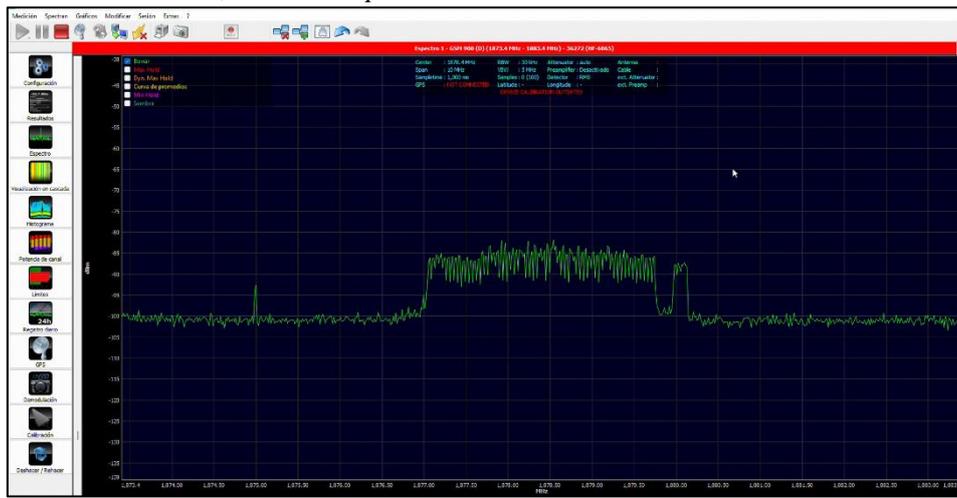


Nota. Elaboración propia

Como la red LTE trabajó con un dl_EARFCN de 1934, se tuvo una frecuencia de DL de 1878,4 MHz y una frecuencia de UL de 1783,4 MHz por lo que se procedió a setear estas frecuencias para analizar el comportamiento del espectro cuando el canal estaba siendo ocupado. En la figura 68 con el simple hecho de ejecutar el eNB se crea ya el canal que servirá para la transmisión, se puede ver claramente el ancho de banda del canal, que en este caso es de 3 MHz.

Figura 68

Frecuencia de DL, canal listo para transmitir



Nota. Elaboración propia

El espectro sufre variaciones cuando se está ocupando el canal, en la figura 69 se observa que todo el canal está inundado de paquetes, esto se debe a que se ejecutó un test de Speedtest desde el UE.

Figura 69

Frecuencia de DL, canal ocupado – máxima capacidad



Nota. Elaboración propia

Para el caso del UL se obtuvieron las figuras 70 y 71, cuando el canal está libre y cuando está siendo ocupado por el UE para subir alguna información hacia internet.

Figura 70

Frecuencia de UL, canal listo



Nota. Elaboración propia

Figura 71

Frecuencia de UL, canal ocupado – transmitiendo hacia la red del eNB



Nota. Elaboración propia

6.3. Pruebas al prototipo completo UAV_eNB

Finalmente se sometió a pruebas al prototipo completo, en primer lugar, se ensambló el nodo LTE en el UAV (ver figura 58) y con eso se lo tuvo listo para los vuelos de prueba.

Como se mencionó al inicio de esta sección, se evaluarán parámetros como funcionalidad, operatividad, eficiencia y autonomía lo que permitirá obtener un criterio general de calidad del prototipo.

6.3.1. Funcionalidad

El prototipo del sistema de comunicación móvil de emergencia presenta funcionalidades con respecto a la rapidez de su despliegue por usar un UAV y lo más importante presenta una red que, aunque experimental, los resultados de sus pruebas en la realidad demostraron que sí es capaz de funcionar para proveer cobertura móvil a los UEs.

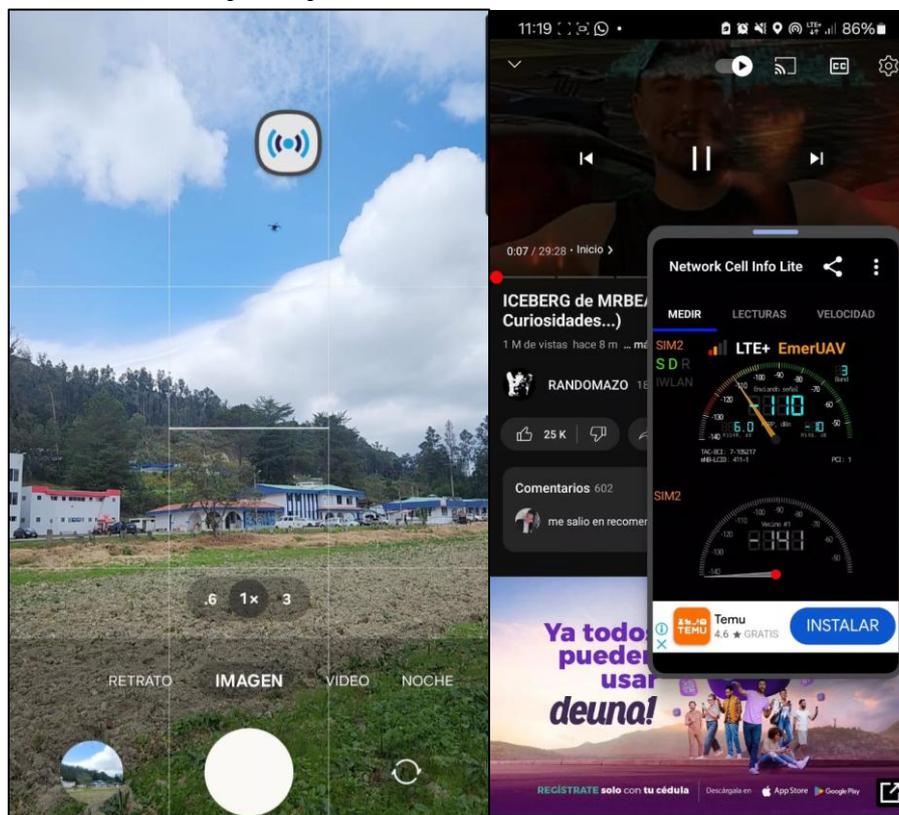
En la figura 72 se puede observar al prototipo en acción, mientras se realiza un vuelo estacionario sobre los UEs estos mantuvieron cobertura y por lo tanto datos móviles que les permitieron ingresar a plataformas como YouTube, WhatsApp, entre otros.

Se debe mencionar que el BackHual de red fue una conexión de WiFi por medio de un HotSpot ubicado en la estructura del UAV para evitar latencias altas.

El prototipo es totalmente funcional con respecto a lo que debe hacer y para lo que fue construido.

Figura 72

Funcionalidad del prototipo



Nota. Elaboración propia

6.3.2. Operatividad

Este punto ya fue evaluado en el UAV sin la estación LTE, en este caso se evaluará todo el prototipo completo, es por eso que se puede afirmar que al agregarle la estación LTE variaron algunos aspectos para la operación del UAV.

Tal como se había tratado en puntos anteriores, el modo de vuelo ideal para poner en marcha el sistema era el modo “Loiter” el cual hacía uso del GPS para ajustar su posicionamiento vertical y horizontal. Sin embargo, el dispositivo SDR al ser un radio transceptor provocó tal interferencia que no permitió al GPS establecer conexión con los satélites y este modo de vuelo no se pudo concretar. Por tal motivo, se tuvo que volar en el modo “Alti Hold” el cual mantiene su posición vertical pero el operador debe estar pendiente de su movimiento horizontal y transversal, lo cual disminuye en cierta medida su operatividad.

Como se observa en la figura 73, el operador no debió quitar la mirada del prototipo en ningún momento, asimismo siempre permaneció con el transmisor apuntando al UAV para tener buena conectividad y poder realizar los ajustes debidos.

Los resultados en este punto dentro de una escala del 1 al 10 se puede considerar un 8 por operatividad.

Figura 73

Operatividad del prototipo



Nota. Elaboración propia, el operador es el autor

6.3.3. Autonomía

Esta variable depende de muchos factores, entre los más destacados el peso y condiciones climáticas. Se agregaron 4 dispositivos al UAV, el Power Bank (20000 mAh), Raspberry Pi 4, BladeRF y un dispositivo móvil encendido un Hotspot. Todo esto en conjunto tienen un peso aproximado de 1,7 Kg, peso extra importante a considerar.

También se probó la alimentación del nodo LTE con la batería del UAV, sin embargo, no fue exitoso puesto que descargaba aún más rápido la batería y se llegaron a desbalancear las celdas, resultando en un problema complicado, debido a que el cargador/balancedor con el que se contaba no era tan preciso para balancear nuevamente cada celda al valor correspondiente, es por eso que se tuvo una pequeña desproporción en una celda respecto a las demás.

Por lo que, se realizó el vuelo con los cuatro dispositivos a bordo y se pudo notar que los motores se estaban esforzando, no era problema, ya que, son motores que pueden levantar peso tranquilamente, sin embargo, se pudo constatar que el tiempo de vuelo disminuyó un 57%, claramente no solo fue influencia del peso extra, sino también de los vientos más intensos que se suscitan en estas temporadas del año, desde finales del mes de Julio hasta el los días finales del mes de Noviembre. Es decir, se pasó de tener 28 minutos de vuelo a tener 12 minutos de vuelo con la batería de 8000 mAh, es una reducción considerable, sin embargo, se pudo comprobar que el desempeño del UAV frente a intensos vientos fue satisfactorio y no provocó ningún tipo de percance al momento de volar.

Se creía que una batería con mayor capacidad se tendría mejores beneficios con respecto a la autonomía del UAV, por lo que se adquirió una de 12000 mAh para corroborarlo. El peso de la nueva batería fue de 1610g, mientras que de la de 8000 mAh era de 1110g, por lo que al agregar medio kilo adicional al prototipo la autonomía se vio perjudicada, reduciendo considerablemente el tiempo de vuelo, llegando alrededor de los 7 – 8 minutos.

En la figura 74 se puede observar la diferencia de tamaño de las baterías utilizadas para realizar la evaluación de autonomía del prototipo, asimismo se evidencia que las baterías corresponden a la capacidad de 8 Ah y 12 Ah y sus demás especificaciones son exactamente las mismas.

Figura 74

Operatividad del prototipo

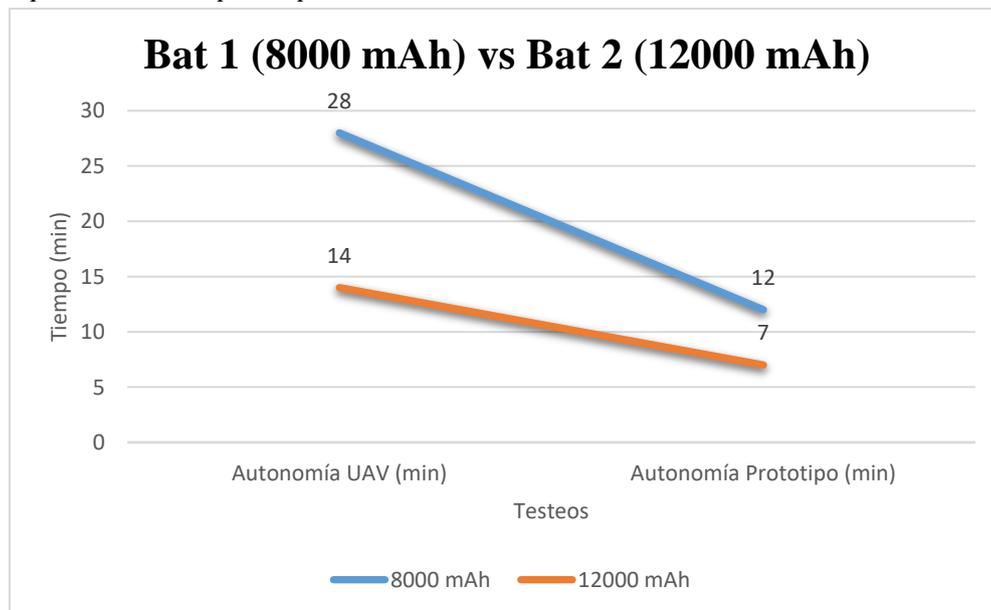


Nota. Elaboración propia

De esta manera se ha elaborado el siguiente gráfico que expone una comparativa en autonomía tanto para el UAV como para el prototipo completo, es decir el UAV + nodo LTE.

Figura 75

Operatividad del prototipo



Nota. Elaboración propia

De la figura 75 se puede extraer el siguiente análisis:

1. Capacidad \neq autonomía garantizada

Aunque la batería de 12000 mAh tiene un 50% más de capacidad frente a la de 8000 mAh, en ambos casos de testeo (UAV libre y Prototipo Completo) ofrece menos autonomía. Esto quiere decir que el peso adicional de 500 g contrarresta completamente el beneficio de la mayor capacidad.

2. Relación peso – capacidad ineficiente

Al usar la batería de 12000 mAh en el UAV libre se pierde alrededor de 14 minutos de autonomía, mientras que en el prototipo se pierden 5 minutos, demostrando así que el sistema está muy sensible al peso adicional y que el incremento en capacidad no compensa la penalización energética por masa.

3. Batería 8000 mAh más eficiente en relación energía/peso

Es un hecho que la batería 2 puede almacenar más energía, sin embargo, su peso elevado incrementa el consumo de corriente por minuto.

La batería 1 tiene una mejor relación energía útil / masa total, especialmente en esta aplicación donde el UAV requiere maniobrar con estabilidad.

Es así que: menor peso, menor empuje requerido y menor consumo de corriente por motor, lo cual, resulta en más tiempo de vuelo por carga de batería.

- **Relación motor-propelas (hélices)**

Un punto clave para la eficiente energética es la perfecta relación entre estos dos mencionados componentes del UAV, para este caso en concreto, al ser motores de KV bajo, 330 KV, para ser exactos, requieren propelas más grandes, ya que, dichos motores al girar más lento tienen más torque y requieren hélices grandes para transformar el giro en empuje de forma efectiva, alrededor de 13 a 18 pulgadas con un paso bajo (4.5 a 6). Esta elección se hizo conforme a las especificaciones del motor para su correcto funcionamiento, eligiendo hélices de 15 pulgadas con paso de 5.2 en material de plástico por su flexibilidad y peso.

Entre los beneficios que otorga esta correcta relación se encuentran:

- Menor corriente consumida.
- Mayor eficiencia en vuelo estacionario o de carga.
- Menor temperatura y estrés en los componentes.

6.3.4. Eficiencia del prototipo

La eficiencia del prototipo depende del rendimiento de la red y de la autonomía del UAV principalmente.

El rendimiento de la red se puede constatar en el siguiente video/evidencia:

https://github.com/Vichearias10/Evidencia_Pruebas-Prototipo-UAV_eNB/tree/main

En el mismo se observa que el UVA-eNB va tomando altitud y la conectividad no se pierde, el UE continúa navegando por la red, se comprueban los metros de altitud y se va midiendo la potencia de la recepción de la señal LTE.

La autonomía ya se analizó previamente y es un punto que se puede mejorar con una batería de mayor capacidad. Además, realizando un análisis costo-beneficio resulta una implementación apropiada con respecto al uso de los recursos.

6.3.5. Cobertura del prototipo

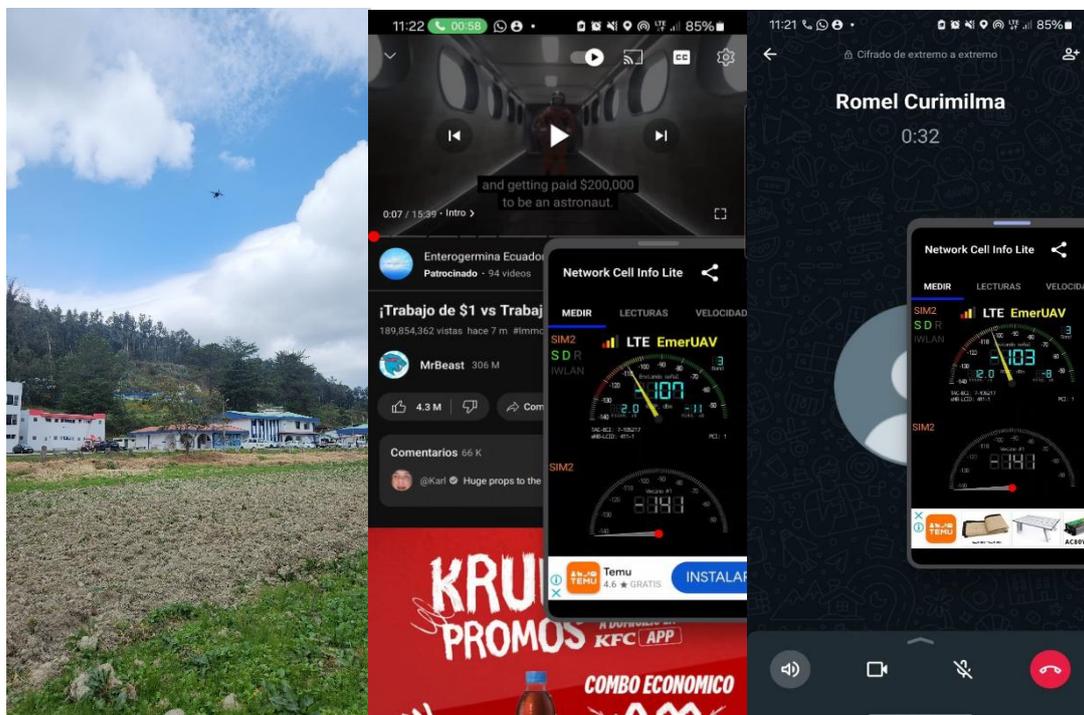
Para medir este parámetro se usaron dos aplicaciones móviles, la primera se trata de “Network Cell Info Lite” y la segunda “G-NetTrack Pro”.

Las dos aplicaciones instaladas en el UE pudieron constatar la cobertura del UAV_eNB realizando mediciones de recepción de señal y creando un pequeño mapa de cobertura donde se puede evidenciar la calidad de señal recibida.

En la figura 76 se presenta la comprobación de conectividad cuando el prototipo se encontraba en el aire, acceso a navegar por internet y hasta se estableció una llamada de otro UE conectado a la estación LTE.

Figura 76

Cobertura del prototipo

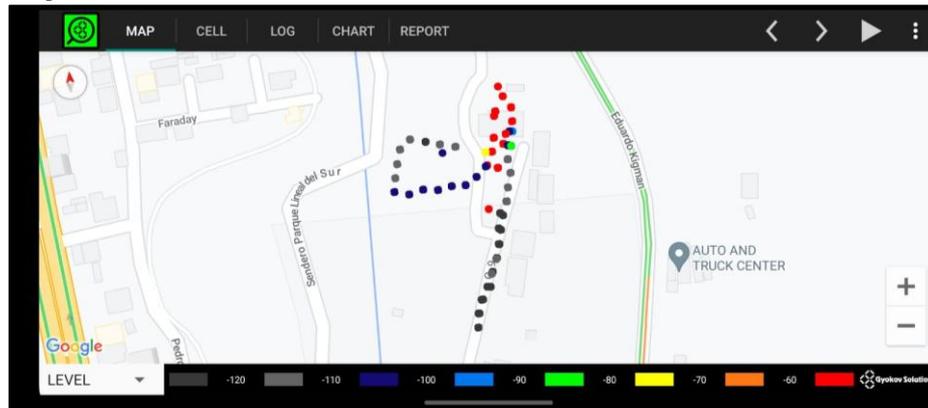


Nota. Elaboración propia

Además, con los registros log que realizaba la aplicación G-NetTrack Pro se pudo crear un pequeño mapa de cobertura, el cual se indica en la figura 77, el mismo colorea los puntos donde se realizó la medición de acuerdo al nivel de recepción de señal que captó en ese momento.

Figura 77

Mapa de cobertura – Zona de conectividad habilitada



Nota. Elaboración propia

6.3.6. Calidad del prototipo

Como ya se han topado todos los puntos a evaluar y se ha considerado los aspectos positivos y negativos del prototipo, se cree conveniente que la evaluación para la calidad del sistema en una escala de: Muy mala, mala, regular, buena y muy buena, obtendría una calificación de “Buena”.

6.4. Análisis de consumo eléctrico de nodo LTE

El nodo LTE formado por 2 dispositivos son los que consumen energía activamente, la Raspberry pi 4 y el SDR Blade Rf.

6.4.1. Consumo Raspberry Pi 4

Este mini-computador encargado de ser el hardware de procesamiento para levantar el nodo LTE, estando el EPC y eNB ejecutándose, consume unos pocos vatios en reposo como 2.7 W y hasta 6-7 W con carga alta. Según un análisis de su documentación, se evidencia que la raspberry pi 4 puede llegar a consumir 6.4 W de potencia y al agregarle un ventilador pequeño para disipación de calor consume alrededor de 1 W con 5 V de entrada.

6.4.2. Consumo de SDR Blade RF

El transceptor Blade RF (conectado por USB 3.0) toma su alimentación de la raspberry pi 4. Según la documentación del fabricante, un BladeRF solo puede consumir hasta 4 W (0.8 A a 5 V) en uso típico. En la práctica los valores son un tanto inferiores. Dado que en el nodo

LTE se utiliza un ancho de banda bajo (3 MHz), el consumo va a estar por debajo del consumo máximo, entre los 3 – 4 W.

Dados estos valores se puede obtener un consumo por hora y así tener una perspectiva amplia de la cantidad de energía que requiere el nodo LTE para su funcionamiento y además poder saber con certeza por cuanto tiempo estaría alimentado si se usa una fuente de alimentación externa como lo es un Power Bank.

6.4.3. Consumo total por hora

Sumando todos los consumos de cada componente, el nodo LTE completo demandaría de 10 a 12 W de energía máxima (caso extremo), en total unos 2 A - 2.4 A a 5 V. Por lo que, tomando un promedio de 11 W, en una hora equivale a 11 Wh (vatios-hora) de energía consumida. Convirtiendo esta cantidad a corriente consumida, sería de la siguiente manera:

$$mAh = \frac{11W}{5V} = 2200 mAh \quad (5)$$

Tabla 16. Resumen de los consumos energéticos

Componentes	Corriente Aproximada (A)	Potencia Aproximada (W)
Raspberry Pi 4	1.2 - 1.3	6 – 7
BladeRF SDR	0.7 - 0.8	3.5 – 4
Total	2.1 - 2.3	9.5 – 11

Nota. Elaboración propia

El consumo real puede variar según la carga del trabajo que esté procesando en ese momento, por ejemplo, si la CPU de la raspberry no está al 100% todo el tiempo, o si la transmisión LTE no es continua al máximo, la demanda estará en el extremo inferior del rango.

6.4.4. Autonomía con la Power Bank de 20000 mAh

Al haber usado una batería externa de 20000 mAh a 5 V, se puede conocer el tiempo de autonomía de la siguiente manera:

- **Capacidad energética de la batería:** Como la batería es de 20000 mAh a 5 V, tendría una energía total de 100 Wh, sin embargo, la realidad de las celdas internas tiene un valor nominal de 3.7 V por lo que corresponde a 74 Wh almacenados. Además, al convertir esa energía a 5 V conlleva pérdidas, es por eso que de forma efectiva entregaría 66.6 Wh de energía.
- **Tiempo de funcionamiento esperado:** Con un consumo máximo de 11 W por el nodo LTE, en teoría ideal 74 Wh de batería podría proveer por 6.7 horas, pero al restarle las pérdidas por la conversión de voltaje, la autonomía práctica estaría alrededor de 6 horas

(66/11 = 6). El nodo LTE podría estar en funcionamiento de manera continua de 6 a 7 horas en condiciones reales.

De forma práctica se usó un dispositivo (KWS-2302C) para medir el consumo de manera real, en la figura 78 se puede observar que no se superan los 3.4 W resultando en un consumo eléctrico de 607 mAh, el cual está por debajo del límite máximo que se había mencionado anteriormente, lo que resulta que el nodo LTE no demanda de mucha energía para su operación.

Figura 78

Consumo eléctrico real



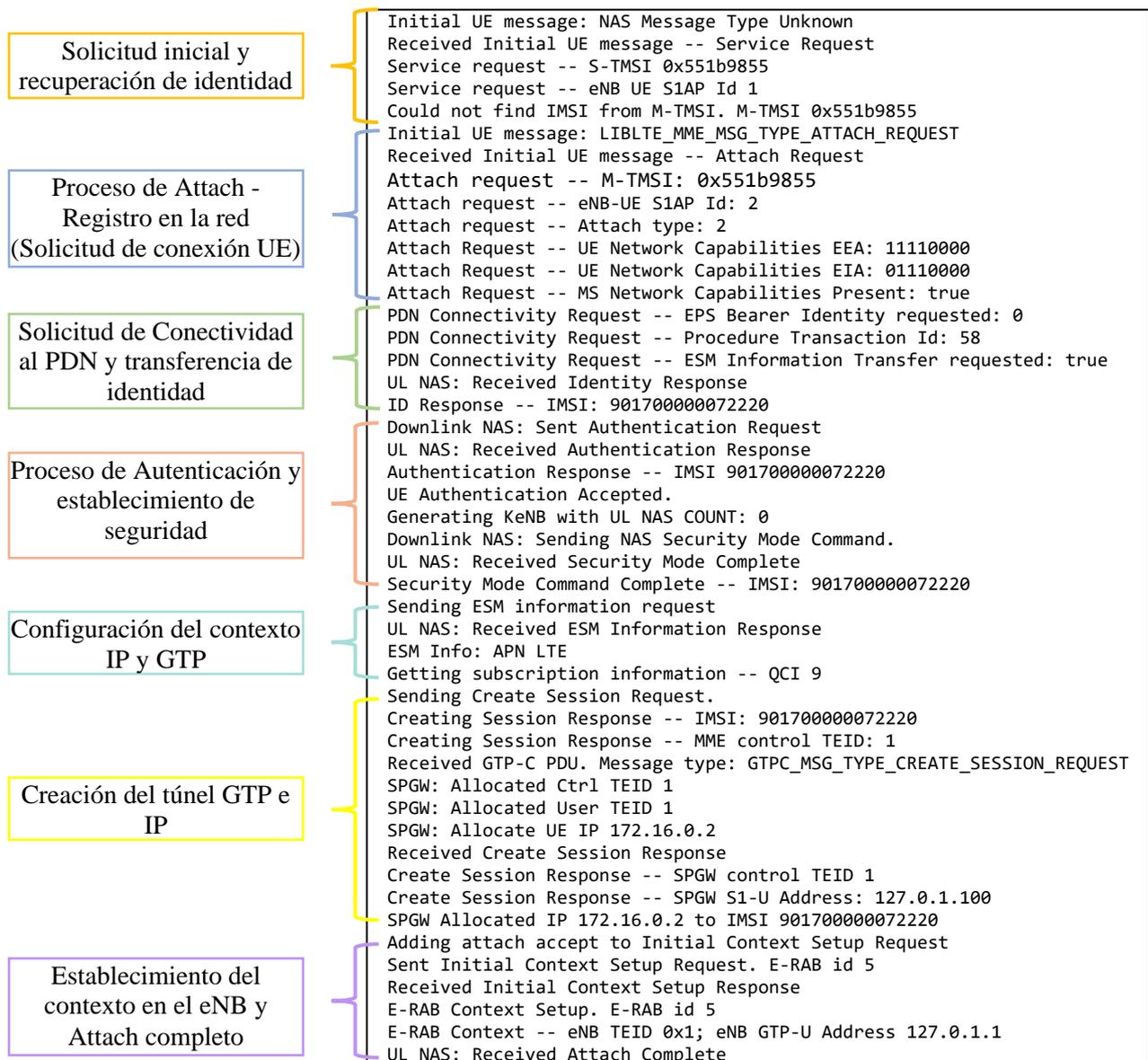
Nota. Elaboración propia

6.5. Análisis de seguridad del nodo LTE montado con srsRAN 4G

Es un punto importante a tener en cuenta, sin embargo, al tratarse de un software de código abierto y para espacios de implementación experimental se tendrá ciertas limitaciones o vulnerabilidades en este ámbito de seguridad e integridad de los datos.

En primera instancia, se procederá a seccionar e identificar las partes del proceso que se realiza entre el EPC y el UE cuando se conecta a la red LTE.

El proceso consta de un registro de mensajes intercambiados entre una Estación Base (eNB), el MME (Mobility Management Entity) y el SPGW (Serving and PDN Gateway) durante el procedimiento de registro y conexión inicial de un usuario (UE) en una red LTE.



Una vez descrito de forma general el proceso que se lleva a cabo entre el UE y el EPC, es turno de adentrarse al análisis sobre la seguridad que se tiene en esta red montada con srsRAN 4G.

- **Arquitectura de seguridad en LTE comercial**

Se diseñó con múltiples capas de seguridad, en el plano de control (NAS/S1AP) y en el plano de usuario (GTP-U):

- Autenticación mutua (USIM + HSS), algoritmo MILENAGE
- Generación de claves derivadas (KASME, KeNB, KUPenc)
- Integridad de mensajes NAS (EIA) y de RRC
- Cifrado de tráfico NAS, RRC y plano de usuario (EEA)
- Asignación dinámica de IP y portadoras (bearers)

- **Seguridad implementada en srsRAN 4G**

1. Autenticación NAS y derivación de claves

- SrsRAN incluye una HSS embebida con claves y perfiles de abandono definidos manualmente en el archivo user_db.csv.
- El MME utiliza MILENAGE para autenticar al UE.
- Se deriva la clave KASME y KeNB se usa para cifrado de RRC y NAS. KNASint, KNASenc para seguridad NAS.

2. Soporte de algoritmos de cifrado/integridad

- NAS y RRC pueden ser protegidos con EEA/EIA.
 - o EEA0, EEA1 (AES), EEA2 (Snow 3G)
 - o EIA0, EIA1, EIA2
- La negociación de seguridad (Security Mode Command) ocurre durante el Attach y está implementada en el código fuente.

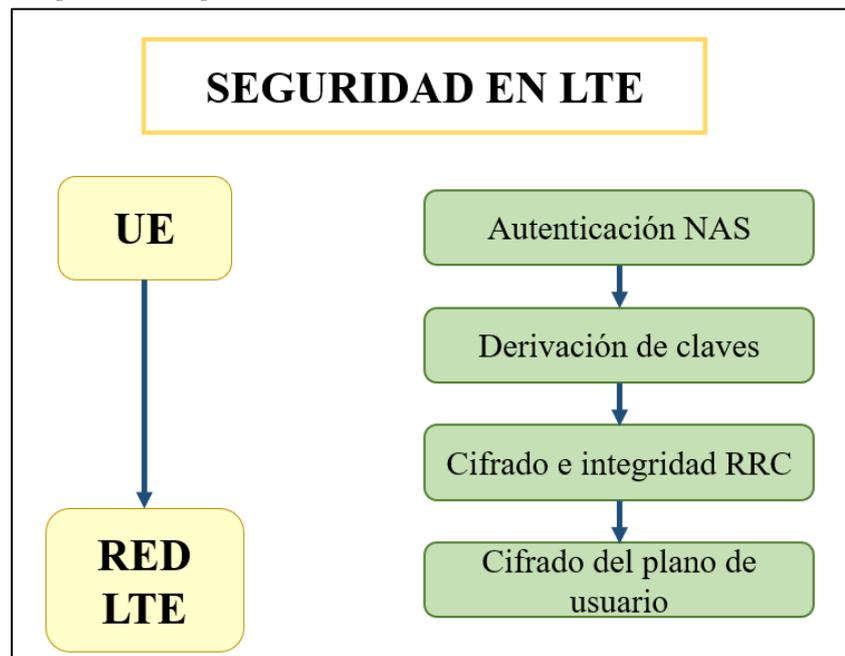
3. Cifrado de plano de usuario (GTP-U)

- No está cifrado por defecto en srsRAN, ya que GTP-U no lleva seguridad nativa.
- No hay Isec (Internet Protocol Security) entre eNB y EPC.
- El tráfico puede viajar en texto claro.

En la figura 78 se observa un diagrama resumen acerca del proceso que se cumple para otorgar seguridad a los UEs en la red LTE.

Figura 79

Diagrama de seguridad LTE



Nota. Elaboración propia

- **Vulnerabilidades y limitaciones**

Como se mencionó, al tratarse de una red LTE experimental presenta limitaciones en cuanto a seguridad, como tratar el tráfico de usuario sin cifrado (plano de usuario GTP-U), ya que, al no estar protegido por defecto, queda expuesto a posibles interceptaciones si se accede al túnel entre eNB y SPGW.

Como este paquete srsRAN 4G acepta algoritmos nulos (EEA0/EEIA0), al no modificarse esta configuración, el sistema podría establecer conexiones sin protección criptográfica real.

Asimismo, no cuenta con mecanismos de detección de intrusos, al no tener un control del tráfico mediante firewall, un atacante podría conectarse sin restricciones.

Finalmente, las comunicaciones internas del EPC con el eNB, viajan en texto plano, debido a que no se emplea Isec (Internet Protocol Security) ni TLS (Transport Layer Security) y con ello se deja expuestas las interfaces internas.

6.6. Análisis de costos

En esta subsección se detallará un cálculo aproximado de todos los costos involucrados para el desarrollo de este trabajo. En la tabla 16 se pueden observar los costos de la implementación del prototipo que corresponden al hardware, ya que, el software con el que se trabajó fue de código abierto.

Tabla 17. Detalle de costos del hardware utilizado para implementación

Hardware	Cantidad	Costo U (\$)	Costo Total (\$)
650 Sport Quad-Copter foldable frame TL65S01	1	1	130
Tarot 6S 4008 330KV MT motor TL2955	5	40	200
ESC XRotor-40A TL2923	5	14	70
Holybro-CONTROLADOR DE VUELO Pixhawk 6C, M9N y Módulo PM07	1	320	320
Propelas plegables de 15"	4	13	52
Accesorio para Hélices-tarot	4	7	28
Transmisor Radiolink AT9S-PRO receptor R12S	1	150	150
Cargador de baterías LiPo	1	60	60
Batería LiPo	1	90	90
Total UAV			\$ 1072

Laptop Acer Predator Triton 300	1	1780	1780
Rasberry Pi 4	1	170	170
SDR BladeRF V.2	1	880	880
Power Bank LDNIO	1	32	32
Antenas de banda ancha	4	20	20
Programador + Tarjetas SIM + Adaptador	1	120	120
Total RED LTE			\$ 3002
Total IMPLEMENTACIÓN			\$ 4074

7. Discusión

En el proceso de implementación de los subsistemas que conformaron el prototipo, se requirió un ensamble óptimo de todos los componentes del hardware del UAV logrando así una mayor confianza en el subsistema base del prototipo, es por eso que, se debió completar a cabalidad la configuración de la controladora de vuelo en el software Mission Planner, teniendo mucha sutileza al momento de la calibración de la brújula, compás y axis del UAV, puesto que, de ello depende el correcto desempeño en el vuelo, ya que, mientras mejor sea la calibración, mejor será la respuesta del UAV frente a escenarios complicados. Se encontró muy importante esta parte y los resultados del vuelo fueron satisfactorios. Además, al utilizar los modos de vuelo como Loiter y Auto adquirirían mucha más importancia las configuraciones y calibraciones previas, debido a que se requiere del GPS para su posicionamiento preciso y con ello se eviten inconvenientes en sus pruebas.

Un parámetro fundamental del UAV fue la batería, esta presentó un excelente rendimiento cuando no tenía peso extra, llegando a una autonomía de vuelo de 28 minutos, siendo un valor muy adecuado que podría poner un punto de comparación con los UAVs comerciales de la marca DJI.

Por otro lado, el subsistema que abarca la implementación de la estación móvil LTE requirió de un hardware de procesamiento simplificado que permitiera su ejecución, ya que, de otro modo, no se lo iba a poder añadir al UAV si se tenía como hardware de procesamiento a una laptop. Es aquí donde adquirió gran importancia la Raspberry Pi 4, la cual demostró ser un hardware lo suficientemente robusto para esta implementación. Dado que la Raspberry Pi 4 necesitaba optimizar al máximo su sistema operativo, fue muy beneficioso poder implementar el nodo LTE a través de una serie de comandos. En primera instancia, existieron algunos inconvenientes con respecto a la conexión de los UEs, pero con los ajustes realizados en el eNB, como establecer el ancho de banda en 3 MHz, trabajar en otra banda LTE, cambiar el modo de transmisión y modificar el valor de ganancia en la transmisión como en la recepción bastaron para poder conectar los UEs. Se comprobó la conexión de cuatro UEs simultáneamente, los mismos tuvieron acceso a la red de datos y se pudo navegar por internet como normalmente se lo haría dentro de cualquier red de datos.

El rendimiento de la red fue óptimo en relación con los recursos disponibles, al usar los dos flujos de transmisión que permite el SDR se pudo analizar en el espectro que se aprovechaba el canal de 3 MHz eficientemente, aunque, durante todas las pruebas realizadas, siempre se notó una característica particular, la red debía “estabilizarse” para que no existan

desconexiones de los UEs, puesto que al iniciar la ejecución del eNB los UEs se lograban conectar pero después de unos segundos se desconectaban. Se esperaba unos segundos y la conectividad se restablecía y conforme pasaba el tiempo la red iba siendo mucho más estable.

Una vez se unificaron los dos subsistemas se procedió a realizar pruebas de cobertura, tasas de transferencia, operatividad y autonomía con el prototipo de comunicación móvil de emergencia ya ensamblado. Para analizar la cobertura máxima del prototipo se procedió a realizar mediciones de recepción de señal mediante la aplicación móvil “Network Cell Info Lite”, llegando a tener hasta 100 metros de cobertura, sin embargo, en este punto ya la señal estaba totalmente deteriorada, pero fue un buen parámetro para analizar. Otro punto además de las ganancias de TX y RX, fue las frecuencias en las que se levantó el eNB tanto para DL como para UL, 1,873 GHz y 1,783 GHz respectivamente, son frecuencias no tan altas, por lo que, la longitud de onda puede llegar a más distancia sin perder tanta energía. Al analizar las tasas de transferencia en el DL y UL se verificó que la red tenía hasta 15 Mbps en DL y hasta 5 Mbps en el UL, y mientras la distancia iba siendo mayor las tasas cayeron hasta 1 Mbps en DL y UL.

La operatividad del prototipo completo fue un parámetro crítico que requirió de análisis minucioso, la repentina pérdida de señal de los satélites siempre que se encendía en nodo LTE suponía que se habían descalibrado los sistemas del UAV, hasta que al estar experimentando y analizando a detalle, se corroboró que en el momento preciso que se alimentaba al BladeRF por su cable USB3.0, el GPS perdía totalmente la señal de los satélites y cuando se desconectaba el BladeRF, nuevamente se enlazaba el GPS con los satélites, cabe recalcar que el BladeRF aún no se encontraba transmitiendo, el solo hecho de estar alimentado generaba interferencias que hacían que el GPS perdiera conexión. Se intentó mitigar envolviendo el cable y el SDR con papel aluminio, como si se tratase de una jaula de Faraday, no se consiguió éxito alguno. Por lo que la operatividad del UAV se iba a tener que realizar con otro modo de vuelo, en este caso Alti Hold, el cual mantenía la altitud, usando sus sensores como barómetro, acelerómetro y giroscopio y el operador debía reajustar manualmente su posición horizontal. De esa forma se realizaron los respectivos test y evaluaciones al prototipo, obteniendo una efectividad del cien por ciento respecto a operatividad del UAV.

El aspecto que impactó negativamente en el prototipo completo fue la autonomía de la batería del UAV, el peso y las condiciones climáticas hicieron que la batería se descargara más rápido disminuyendo el tiempo de vuelo hasta 11 – 12 minutos, es importante recalcar que al agregar el nodo LTE con su alimentación energética representó alrededor de 1,7 KG, es por eso que, los motores consumían mayor energía por minuto y se afectó a la autonomía del

prototipo. Sin embargo, es una variable que se debe tener en consideración en implementaciones futuras, si se va a levantar más peso se necesita de una configuración de UAV más robusta, con motores de KV más bajos y propelas más grandes, asimismo de una batería con mayor capacidad y mejor eficiencia energética con respecto al peso de la misma,

Con el despliegue del prototipo en el aire y la realización de vuelos estacionarios se pudo verificar que este sistema sí es uno adecuado para atender situaciones difíciles, permite la conectividad a la red LTE levantada “EmerUAV”, ofrece servicio de datos con un ancho de banda, que, aunque poco, sería suficiente para establecer una comunicación y presenta buena cobertura. Para estos fines experimentales se consideró como red de backhaul a una conexión WiFi establecida desde un hotspot en un smartphone, lo cual fue suficiente para realizar la evaluación del prototipo, sin embargo, en una situación real, donde las comunicaciones terrestres están afectadas, será necesario un backhaul satelital y si es posible de gran capacidad.

Finalmente, al tratarse de un prototipo, con equipos de laboratorio y un presupuesto económico ajustado, se optó por utilizar componentes accesibles y soluciones de código abierto, representando una restricción importante durante el desarrollo, ya que implicó aprovechar los recursos disponibles, tratando de no comprometer la funcionalidad principal del prototipo final.

8. Conclusiones

Al haber completado de forma exitosa cada una de las fases de la metodología propuesta se puede concluir que se logró cumplir con la implementación del prototipo de un sistema de comunicación móvil de emergencia, en este caso con arquitectura LTE, totalmente funcional, para solventar la falta de conectividad utilizando un UAV, que permita un rápido y efectivo despliegue en la zona donde se requiere establecer comunicación.

Se analizaron las tecnologías de comunicación móvil y se optó por implementar LTE, sobre un software de código abierto denominado srsRAN_4G, el cual presenta todas aplicaciones que se encuentran en el núcleo de la red EPC, como el MME, HSS, SGW y PGW, además cuenta con múltiples bandas de operación, un ancho de banda flexible que va de 1,4 – 3 – 5 – 10 – 15 – 20 MHz, tiene Esquema de Modulación y Codificación (MCS) que permite tasas de transferencias de hasta 100 Mbps, presentando buena cobertura que al ser implementada sobre un UAV tendría gran movilidad para establecer conectividad a los UEs. En el caso de la red implementada se trabajó con un ancho de banda de 3 MHz, con frecuencias de DL y UL de 1,873 GHz y 1,783 GHz respectivamente, debido a que el hardware de procesamiento no permitía mayor capacidad, además estos valores fueron los recomendados de acuerdo a la documentación de srsRAN, con el objetivo de evitar desconexiones y problemas de inestabilidad de la red. Por lo que, la red LTE con estos parámetros funcionó perfectamente durante todo el tiempo que permaneció activa.

El UAV diseñado e implementado presenta propiedades robustas con respecto a sus componentes, sus motores de 330 KV pueden levantar cargas útiles más pesadas y junto a los ESC de 40 A permiten una respuesta excelente frente a escenarios complicados, como intensos vientos o pesos extras, además su controladora de vuelo permite varios modos de vuelo que son necesarios para tener mejor operatividad del UAV y facilitarle el trabajo al operador en tierra, cuenta con gran radio de cobertura que alcanza hasta los 4 km en el aire. Se incorporó un módulo para transmitir telemetría al radiocontrol y tener en cuenta las variables como el nivel de voltaje de la batería del UAV, metros de altitud, velocidad tanto vertical como horizontal, el número de satélites conectados y la posición (Lat, Long).

El prototipo completo se pudo evaluar de forma absoluta y satisfactoria, los escenarios donde se desplegó fueron los ideales para poder medir cada una de las variables, de este modo se analizó el rendimiento de la red, su cobertura y su capacidad de transferencia hacia los UEs en tierra, se tubo conectividad que variaba desde los -80 dBm hasta los -120 dBm respecto a la relación de distancia del UAV_eNB con el UE, durante todas las pruebas se tuvo acceso a la

red de datos y se permitió a los UEs la navegación por internet. Respecto a la operatividad, al no poder volar con la ayuda del GPS, se vio de cierto modo afectada, ya que el operador debía estar corrigiendo la posición horizontal del UAV, sin embargo, no añadió mayor dificultad en el proceso de evaluación y se recopilaron resultados óptimos.

El backhaul de red adquirió gran importancia, ya que cuando se establecía una conexión hacia una red WiFi de altas prestaciones, la red LTE implementada tenía menos delay en la transferencia de datos hacia la red externa, de este modo, se optó por usar un hotspot de una red móvil que tuviera excelente cobertura en el escenario de pruebas, resultando beneficioso esta conexión establecida entre el hotspot con la Raspberry Pi 4, donde se estaba ejecutando el núcleo de la red (EPC) y se pudo tener una salida a la red externa mucho más limpia, con mayor capacidad y menos latencia. Cabe aclarar que el usar un backhaul de red por medio de una conexión WiFi se lo realizó por fines experimentales y prototipado, en una situación real el backhaul ideal sería un enlace satelital con el UAV_eNB.

Finalmente, es importante tener en consideración la autonomía del UAV_eNB. Con los resultados obtenidos correspondientes al tiempo de vuelo se puede afirmar que la batería se quedó corta para la carga extra que se agregó con el eNB a bordo del UAV, por tal motivo, al tratarse de peso extra, un UAV con especificaciones más robustas podría obtener mejor autonomía con respecto a su relación consumo energético/peso.

9. Recomendaciones

Se recomienda que se busque asesoría de una persona especializada en la construcción y configuración de UAVs si se desea implementar uno, puesto que esta fue la base para poder realizar una selección correcta de los componentes, la misma que aseguró confiabilidad en el momento de puesta en marcha.

Un aspecto fundamental a tener en consideración es el tiempo de importación de los componentes del UAV hacia el país de destino, se recomienda que, si se requiere de una implementación de un UAV o si se necesita de algún módulo electrónico en específico, se debe tener un intervalo mínimo de un mes referente al tiempo de llegada, es por eso que en la adquisición de esos componentes debe considerarse ese tiempo que demorarían en llegar al país.

Al necesitarse la implementación de una red LTE experimental en hardware de bajos recursos, se vio necesario e importante, en primera instancia, que se lo realice en una laptop, esto con la finalidad de familiarizarse con los softwares que se requieren, con las configuraciones y las ejecuciones de los programas que levanten la red, una vez llevado a cabo este primer proceso, se adquiere la preparación necesaria para ser implementada en otro hardware diferente.

Es fundamental realizar calibraciones frecuentes de los sistemas del UAV, con el objetivo de evitar posibles contratiempos, la brújula y la IMU de la controladora de vuelo suelen descalibrarse por no tener uso, además se deben realizar las actualizaciones en el firmware para que la controladora esté en condiciones óptimas de vuelo y sigan operando de forma normal y adecuada. Además, cualquier reajuste que se vaya a realizar, es recomendable desmontar las hélices para evitar algún accidente. De la misma manera se necesita tener un cuidado especial con la batería LiPo del UAV, no debe sufrir golpes principalmente y para prolongar aún más su vida útil, no se debe descargar menos de su voltaje nominal, es decir, una batería de 6S no debe descargarse menos de 22,2V, además siempre se debe utilizar un cargador balanceador, el cual carga a todas las celdas por igual.

Se debe tomar en consideración que algunos dispositivos de usuarios UE comerciales no detectan redes configuradas con valores de MCC y MNC de prueba. Es decir, estos valores suelen ser: 901/70, 001/01, etc. Pueden no ser funcionales para algunos UE, especialmente para smartphones de la marca Apple, por lo que se aconseja utilizar el valor específico del país donde se encuentre, con ello se incrementa las posibilidades de que los dispositivos puedan detectar la red.

La cobertura del eNB implementado en el SDR puede ser influenciada por el tipo de antena que se use, por tal razón se recomienda usar antenas de alta ganancia para poder tener la máxima distancia en cobertura, y también se debe tener en cuenta la ubicación de las antenas en el SDR, deben estar de forma perpendicular entre ellas, con ello se reduce la posibilidad de diafonía.

10. Bibliografía

- 3GPP. (2014). *Overview of 3GPP Release 8*.
- Agusti, R., Bernardo, F., Casadevall, F., Ferrús, R., Pérez-Romero, J., & Sallent, O. (2010). *LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES AUTORES*.
- AliExpress. (n.d.). *Hélices plegables de 15 pulgadas*. Retrieved July 29, 2024, from https://www.aliexpress.us/item/2255800088016388.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.72.27371802eA8EQY&gatewayAdapt=glo2usa
- Alnoman, A. (2022). UAV-to-UAV Communication Scheme for Enabling Emergency Services During Network Failure. *2022 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications, ICECTA 2022*, 291–294. <https://doi.org/10.1109/ICECTA57148.2022.9990222>
- Ansari, N., Zhang, C., Roberto Rojas-Cessa, Sakarindr, P., & S. H. Hou, E. (2008). *Networking for Critical Conditions*. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=257f725e287f9d884c88d2e80068993d38255ac7>
- ARCOTEL. (2021). *RESOLUCIÓN ARCOTEL-2021-0393*. <https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/03/Resolucion-ARCOTEL-2021-0393.pdf>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/LOTAIP/2017/DIJU/octubre/LA2_OCT_DIJU_Constitucion.pdf
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2015). *Ley Orgánica de Telecomunicaciones*. <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/05/Ley-Org%C3%A1nica-de-Telecomunicaciones.pdf>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2024). *Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional*. https://strapi.lexis.com.ec/uploads/2_RS_609_20240726_e82a65aeec.pdf
- Ayala, H. (2003). *Diseño y construcción de un bloqueador telefónico para teléfonos celulares que trabajan en las tecnologías AMPS y/o TDMA en la banda de 800 MHz*.
- Azari, M. M., Geraci, G., Garcia-Rodriguez, A., & Pollin, S. (2020). UAV-to-UAV Communications in Cellular Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19(9), 6130–6144. <https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3000303>
- Becvar, Z., Mach, P., & Pravda, I. (2013). *Redes móviles*. <http://improvet.cvut.cz>
- Bernabé Miguel Angel, Baile Simon Débora, Carreón Dora, Cerca Mariano, Culqui Javier, González Maria Esther, González Marcos, Gutiérrez Carlos, Gutiérrez Raul, Herrera

- Giovanni, Padilla Oswaldo, Pauker Francisco, Rodriguez Fabián, Rodríguez Gonzalo, Salazar Rodolfo, Toulkeridis Theoilos, Vasco Carlos, & Zacarías Said. (2015). *Amenazas de origen Natural*.
https://www.researchgate.net/publication/283272582_Amenazas_de_origen_Natural
- Chamba, P., & Imaicela, C. (2018). *Sistema de comunicación para escenarios de emergencia y desastre usando un UAV y tecnologías de radio definida mediante software*.
<https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/20.500.11962/21891/1/Chamba%20Agila%20Paola%20Cecibel%20y%20Imaicela%20Ordoñez%20Carlos%20Ivan.pdf>
- Codon, M. (2019). *Implementación de red LTE con Software-Defined Radio*.
- Coronel, V., Buñay Cantos, J., Coronel Pérez, V., & Buñay Cantos, J. (2009). Universidad y sociedad. In *Revista Universidad y Sociedad* (Vol. 10, Issue 4). Editorial “Universo Sur.”
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202018000400199&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Cosmas, Z., Hans, Z., Mark, W., Savitri, B., & Legrand, W. (2005). *Manual sobre telecomunicaciones de emergencia*.
- CRED, & EM-DAT. (2020). *El costo humano de los desastres Centro de Investigaciones sobre la Epidemiología de los Desastres CRED*. www.undrr.org/sites/default/files/inline-files/El%20Costo%20Humano%20de%20los%20Desastres%202000-2019.pdf
- Dirección General de Aviación Civil. (2020). *Resolución Nro. DGAC-DGAC-2020-0110-R*.
<https://www.aviacioncivil.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/11/5-DGAC-DGAC-2020-0110-R-Reglamento-de-RPAs-1.pdf>
- García, J. Pascual., Molina García-Pardo, J. M., & Llácer, L. Juan. (2014). *Sistemas de comunicaciones móviles*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Garg, C., Kalra, A., & Kalra, S. (2012). Performance Comparison of OFDMA and SCFDMA in LTE Systems. In *International Journal of Wireless Communication and Simulation* (Vol. 4, Issue 1). <http://www.ripublication.com/ijwcs.htm>
- Guillén, J., & Manosalvas, J. (2018). *Diseño e implementación de un sistema de visión artificial para planeación de trayectoria de un vehículo aéreo no tripulado en un entorno cerrado utilizando ROS*.
- Guo, L., Xiong, J., Zhou, J., & Liu, B. (2023). Regional Scanning Strategy of UAV Cluster Platform for Mobile Emergency Broadcasting. *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, BMSB, 2023-June*.
<https://doi.org/10.1109/BMSB58369.2023.10211193>

- Gutiérrez, R. (2021). *Implementación de Software Defined Radio en sistemas de comunicaciones actuales*.
- HobbyKing. (n.d.). *Paquete de batería de polímero de litio Turnigy Graphene Professional de 8000 mAh, 6S y 15 C con XT90*. Retrieved July 29, 2024, from Paquete de batería de polímero de litio Turnigy Graphene Professional de 8000 mAh, 6S y 15 C con XT90
- Holybro. (n.d.). *Pixhawk 6C, GPS M9N, Módulo de potencia PM07*. Retrieved July 29, 2024, from <https://holybro.com/products/pixhawk-6c?variant=43005243982013>
- Hurtado, F. (2018). *Diseño e implementación de una aplicación de cifrado de tráfico para una red móvil usando el algoritmo AES-GCM*.
- ITU. (n.d.). *National Emergency Telecommunication Plans*. Retrieved May 20, 2024, from <https://www.itu.int/en/ITU-D/Emergency-Telecommunications/Pages/NETPs.aspx>
- ITU. (2021). *Telecomunicaciones de Emergencia*. <https://www.itu.int/es/action/emergency/Pages/default.aspx>
- K. Guevara, M. Rodriguez, N. Gallo, G. Velasco, K. Vasudeva, & I. Guvenc. (2015). *UAV-Based GSM Network for Public Safety Communications*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7132971>
- Kirubakaran, B., & Hosek, J. (2023). Optimizing Tethered UAV Deployment for On-Demand Connectivity in Disaster Scenarios. *IEEE Vehicular Technology Conference, 2023-June*. <https://doi.org/10.1109/VTC2023-SPRING57618.2023.10199492>
- Lakshmi Narayanan, R. G., & Ibe, O. C. (2012). A joint network for disaster recovery and search and rescue operations. *Computer Networks*, 56(14), 3347–3373. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.05.012>
- López, O. (2013). *Evaluación de calidad de redes móviles de tecnología HSPA +, implementados en el Ecuador*.
- Ma, D., Feng, Z., & Qin, Y. (2020). Optimization of throughput maximization of UAV as mobile relay communication system. *Proceedings - 2020 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems, ICVRIS 2020*, 798–801. <https://doi.org/10.1109/ICVRIS51417.2020.00196>
- Merwaday, A., & Guvenc, I. (2015). *UAV Assisted Heterogeneous Networks for Public Safety Communications*.
- More, J. (2022). *Estado de la infraestructura de la red de transporte (backhaul) y efecto del despliegue de infraestructura de acceso en la velocidad de Internet móvil*. <http://www.osiptel.gob.pe>

- Nafees, M., Thompson, J., & Safari, M. (2021). Multi-Tier Variable Height UAV Networks: User Coverage and Throughput Optimization. *IEEE Access*, 9, 119684–119699. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3107674>
- Oueis, J., Conan, V., Lavaux, D., Stanica, R., & Valois, F. (2017). Overview of LTE isolated E-UTRAN operation for public safety. *IEEE Communications Standards Magazine*, 1(2), 98–105. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2017.1600875>
- Peng, G., Xia, Y., Zhang, X., & Bai, L. (2018). UAV-aided Networks for Emergency Communications in Areas with Unevenly Distributed Users. *2018 IEEE International Conference on Communication Systems, ICCS 2018*, 25–29. <https://doi.org/10.1109/ICCS.2018.8689172>
- Priyanka Rawat, Majed Haddad, & Eitan Altman. (2015). *Towards efficient disaster management: 5G and Device to Device communication*.
- pySim. (2024). *pySim: lee, escribe y explora tarjetas SIM/USIM/ISIM/HPSIM programables*. <https://github.com/osmocom/pysim>
- Radiolink. (n.d.). *Transmisor y receptor RC Radiolink AT9S Pro*. Retrieved July 29, 2024, from Transmisor y receptor RC Radiolink AT9S Pro
- Rahman, S., Kim, G. H., Cho, Y. Z., & Khan, A. (2018). Positioning of UAVs for throughput maximization in software-defined disaster area UAV communication networks. *Journal of Communications and Networks*, 20(5), 452–463. <https://doi.org/10.1109/JCN.2018.000070>
- Ramirez, F. (2017). *Diseño de un sistema de telecomunicaciones con redes ad hoc de drones como alternativa de medio de comunicación para hacer frente a desastres naturales*.
- Rentas, D. (2015). *Institutionen för datavetenskap Evaluate the Fragmentation Effect of Different Heap Allocation Algorithms in Linux*.
- Salazar, J. (2016). *REDES INALÁMBRICAS*. <http://www.techpedia.eu>
- Sami, T. (2018). *Session 2: 4G to 5G networks and standard releases ITU Asia-Pacific Centre of Excellence Training On “Traffic engineering and advanced wireless network planning.”*
- Secretaría de Gestión de Riesgos. (2016). *Informe-de-situación-n°65-especial-16-05-20161*. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/05/Informe-de-situación-n°65-especial-16-05-20161.pdf>
- Sesia, S., Toufik, I., & Baker, M. (2011). *LTE-The UMTS Long Term Evolution*.

- Shaowei Zhang. (2020). *Research on Emergency Coverage Capability of Fixed-Wing UAV Based on 5G*.
- srsRAN. (2024a). *Manual de Usuario de EPC*. B. https://docs.srsran.com/projects/4g/en/latest/usermanuals/source/srsepc/source/1_epc_intro.html
- srsRAN. (2024b). *srsRAN 4G 23.11 Documentation*. A. <https://docs.srsran.com/projects/4g/en/latest/index.html>
- Statista. (2024). *Los desastres naturales en el mundo - Datos estadísticos*. <https://es.statista.com/temas/3597/desastres-naturales/#topicOverview>
- Tarot RC. (n.d.). *Motor Tarot 6S 4008 330KV MT TL2955*. Retrieved July 29, 2024, from <https://www.tarot-rc.com/Tarot-4008MT-motor-TL2955-p2569844.html>
- Villalobos, J. L. C., Menchaca, A. E. J., Terrazas, A. L., & Vázquez, F. M. (2018). El Mundo de los Drones: Tipos de Drones y sus Principales Usos. *FINGUACH. Revista de Investigación Científica de La Facultad de Ingeniería de La Universidad Autónoma de Chihuahua*, 4(14), 3–5. <https://vocero.uach.mx/index.php/finguach/article/view/332>
- Wenbo Jin, Jixing Yang, Yudong Fang, & Wenchuan Feng. (2020). *Research on Application and Deployment of UAV in Emergency Response*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9152338>
- Yu, H., Liu, Y., Han, M., Zhao, X., Fu, M., Wu, Z., & Li, D. (2023). Latency Optimization for UAVs Based Emergency Communication. *Proceedings of the 18th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2023*, 1280–1285. <https://doi.org/10.1109/ICIEA58696.2023.10241788>
- Yunquera, J. (2006). *Diseño de una red Wi-Fi para la E.S.I.*
- Zheng, J., Shan, C., Li, Q., Xu, J., & Wang, X. (2021). Design of Emergency Rescue Satellite Communication System Based on High-Throughput Satellite. *2021 IEEE 4th International Conference on Electronics and Communication Engineering, ICECE 2021*, 118–122. <https://doi.org/10.1109/ICECE54449.2021.9674622>

11. Anexos

Anexo 1. Bandas LTE

Band	Name	Mode	Downlink (MHz)			Bandwidth DL/UL (MHz)	Uplink (MHz)			Duplex spacing (MHz)	Geographical area	3GPP release	Channel bandwidth (MHz)					Note	
			Low	Center carrier	High		Low	Center carrier	High				1.4	3	5	10	15		20
1	2100	FDD	2110 0	2140 300	2170 599	60	1920 18500	1950 18300	1980 18599	190	Global	8							
2	1900 PCS	FDD	1930 800	1960 900	1990 1199	60	1850 18600	1880 18900	1910 19199	80	NAR	8	1.4	3	5	10	15	20	
3	1800+	FDD	1805 1200	1842.5 1575	1880 1949	75	1710 19200	1747.5 19575	1785 19949	95	Global	8	1.4	3	5	10	15	20	
4	AWS-1	FDD	2110 1950	2132.5 2175	2155 2399	45	1710 19950	1732.5 20175	1755 20399	400	NAR	8	1.4	3	5	10	15	20	
5	850	FDD	869 2400	881.5 2525	894 2649	25	824 20400	836.5 20525	849 20649	45	NAR	8	1.4	3	5	10			
6	850 Japan	FDD	875 2650	880 2700	885 2749	10	830 20850	835 20700	840 20749	45	APAC	8			5	10			Not applicable
7	2600	FDD	2620 2750	2655 3100	2690 3449	70	2500 20750	2535 21100	2570 21449	120	EMEA	8			5	10	15	20	
8	900 GSM	FDD	925 3450	942.5 3625	960 3799	35	880 21450	897.5 21625	915 21799	45	Global	8	1.4	3	5	10			
9	1800	FDD	1844.9 3800	1862.5 3975	1879.9 4149	35	1749.9 21800	1767.5 21975	1784.9 22149	95	APAC	8			5	10	15	20	
10	AWS-3	FDD	2110 4150	2140 4450	2170 4749	60	1710 22150	1740 22450	1770 22749	400	NAR	8			5	10	15	20	
11	1500 Lower	FDD	1475.9 4750	1486 4850	1495.9 4949	20	1427.9 22750	1438 22850	1447.9 22949	48	Japan	8			5	10			
12	700 a	FDD	729 5010	737.5 5095	746 5179	17	699 23010	707.5 23095	716 23179	30	NAR	8.4	1.4	3	5	10			
13	700 c	FDD	746 5180	751 5230	756 5279	10	777 23180	782 23230	787 23279	-31	NAR	8			5	10			
14	700 PS	FDD	758 5280	763 5330	768 5379	10	788 23280	793 23330	798 23379	-30	NAR	8			5	10			
17	700 b	FDD	734 5730	740 5790	746 5849	12	704 23730	710 23790	716 23849	30	NAR	8.3			5	10			
18	800 Lower	FDD	860 5850	867.5 5925	875 5999	15	815 23850	822.5 23925	830 23999	45	Japan	9			5	10	15		
19	800 Upper	FDD	875 6000	882.5 6075	890 6149	15	830 24000	837.5 24075	845 24149	45	Japan	9			5	10	15		
20	800 DD	FDD	791 6150	806 6300	821 6449	30	832 24150	847 24300	862 24449	-41	EMEA	9			5	10	15	20	
21	1500 Upper	FDD	1495.9 6450	1503.5 6525	1510.9 6599	15	1447.9 24450	1455.5 24525	1462.9 24599	48	Japan	9			5	10	15		
22	3500	FDD	3510 6600	3550 7000	3590 7399	80	3410 24600	3450 25000	3490 25399	100	EMEA	10.4			5	10	15	20	
23	2000 S-band	FDD	2180 7500	2190 7600	2200 7699	20	2000 25500	2010 25600	2020 25699	180	NAR	10.3	1.4	3	5	10	15	20	Not applicable
24	1600 L-band	FDD	1525 7700	1542 7870	1559 8039	34	1626.5 25700	1643.5 25870	1660.5 26039	-101.5	NAR	10.1			5	10			
25	1900+	FDD	1930 8040	1962.5 8365	1995 8689	65	1850 26040	1882.5 26365	1915 26689	80	NAR	10	1.4	3	5	10	15	20	
26	850+	FDD	859 8690	876.5 8865	894 9039	35	814 26690	831.5 26865	849 27039	45	NAR	11.0	1.4	3	5	10	15		
27	800 SMR	FDD	852 9040	860.5 9125	869 9209	17	807 27040	815.5 27125	824 27209	45	NAR	11.1	1.4	3	5	10			
28	700 APT	FDD	758 9210	780.5 9435	803 9659	45	703 27210	725.5 27435	748 27659	55	APAC,EU	11.1			3	5	10	15	20
29	700 d	SDL	717 9660	722.5 9715	728 9769	11	Downlink only				NAR	11.3			3	5	10		CA
30	2300 WCS	FDD	2350 9770	2355 9820	2360 9869	10	2305 27660	2310 27710	2315 27759	45	NAR	12.0			5	10			
31	450	FDD	462.5 9870	465 9895	467.5 9919	5	452.5 27760	455 27785	457.5 27809	10	Global	12.0	1.4	3	5				
32	1500 L-band	SDL	1452 9920	1474 10140	1496 10359	44	Downlink only				EMEA	12.4			5	10	15	20	CA
33	TD 1900	TDD	1900 36050	1910 36100	1920 36199	20					EMEA	8			5	10	15	20	
34	TD 2000	TDD	2010 36200	2017.5 36275	2025 36349	15					EMEA	8			5	10	15		
35	TD PCS Lower	TDD	1850 36350	1880 36650	1910 36949	60					NAR	8	1.4	3	5	10	15	20	
36	TD PCS Upper	TDD	1930 36950	1960 37250	1990 37549	60					NAR	8	1.4	3	5	10	15	20	

37	TD PCS Center gap	TDD	1910 37550	1920 37650	1930 37749	20						NAR	8			5	10	15	20	
38	TD 2600	TDD	2570 37750	2595 38000	2620 38249	50						EMEA	8			5	10	15	20	
39	TD 1900+	TDD	1880 38250	1900 38450	1920 38649	40						China	8			5	10	15	20	
40	TD 2300	TDD	2300 38650	2350 39150	2400 39649	100						China	8			5	10	15	20	
41	TD 2600+	TDD	2496 39650	2593 40620	2690 41589	194						Global	10			5	10	15	20	
42	TD 3500	TDD	3400 41590	3500 42590	3600 43589	200							10			5	10	15	20	
43	TD 3700	TDD	3600 43590	3700 44590	3800 45589	200							10			5	10	15	20	
44	TD 700	TDD	703 45590	753 46090	803 46589	100						APAC	11.1		3	5	10	15	20	
45	TD 1500	TDD	1447 46590	1457 46690	1467 46789	20						China	13.2			5	10	15	20	
46	TD Unlicensed	TDD	5150 46790	5537.5 50665	5925 54539	775						Global	13.2			10			20	
47	TD V2X	TDD	5855 54540	5890 54890	5925 55239	70						Global	14.1			10			20	
48	TD 3600	TDD	3550 55240	3625 55990	3700 56739	150						Global	14.2			5	10	15	20	
49	TD 3600r	TDD	3550 56740	3625 57490	3700 58239	150						Global	15.1			10			20	
50	TD 1500+	TDD	1432 58240	1474.5 58665	1517 59089	85						EU	15.0		3	5	10	15	20	
51	TD 1500-	TDD	1427 59090	1429.5 59115	1432 59139	5						EU	15.0		3	5				
52	TD 3300	TDD	3300 59140	3350 59640	3400 60139	100							15.2			5	10	15	20	
53	TD 2500	TDD	2483.5 60140	2489.5 60197	2495 60254	11.5							16.0	1.4	3	5	10			
54	TD 1700	TDD	1670 60255	1672.5 60280	1675 60304	5							18.0	1.4	3	5				
65	2100+	FDD	2110 65536	2155 65986	2200 66435	90	1920 131072	1965 131522	2010 131971	190		Global	13.2	1.4	3	5	10	15	20	
66	AWS	FDD	2110 66436	2155 66886	2200 67335	90 / 70	1710 131972	1745 132322	1780 132671	400		NAR	13.2	1.4	3	5	10	15	20	
67	700 EU	SDL	738 67336	748 67436	758 67535	20	Downlink only				EMEA	13.2			5	10	15	20	CA	
68	700 ME	FDD	753 67536	768 67686	783 67835	30	698 132672	713 132822	728 132971	55		EMEA	13.3			5	10	15		
69	DL b38	SDL	2570 67836	2595 68086	2620 68335	50	Downlink only					14.0			5	10	15	20	CA	
70	AWS-4	FDD	1995 68336	2007.5 68461	2020 68585	25 / 15	1695 132972	1702.5 133047	1710 133121	300		NAR	14.0			5	10	15	20	
71	600	FDD	617 68586	634.5 68761	652 68935	35	663 133122	680.5 133297	698 133471	-46		NAR	15.0			5	10	15	20	
72	450 PMR/PAMR	FDD	461 68936	463.5 68961	466 68985	5	451 133472	453.5 133497	456 133521	10		EMEA	15.0	1.4	3	5				
73	450 APAC	FDD	460 68986	462.5 69011	465 69035	5	450 133522	452.5 133547	455 133571	10		APAC	15.0	1.4	3	5				
74	L-band	FDD	1475 69036	1496.5 69251	1518 69465	43	1427 133572	1448.5 133787	1470 134001	48		NAR	15.0	1.4	3	5	10	15	20	
75	DL b50	SDL	1432 69466	1474.5 69891	1517 70315	85	Downlink only				EU	15.0			5	10	15	20	CA	
76	DL b51	SDL	1427 70316	1429.5 70341	1432 70365	5	Downlink only				EU	15.0			5	10	15	20	CA	
85	700 a+	FDD	728 70366	737 70456	746 70545	18	698 134002	707 134092	716 134181	30		NAR	15.2			5	10			
87	410	FDD	420 70546	422.5 70571	425 70595	5	410 134182	412.5 134207	415 134231	10		EMEA	16.2	1.4	3	5				
88	410+	FDD	422 70596	424.5 70621	427 70645	5	412 134232	414.5 134257	417 134281	10		EMEA	16.2	1.4	3	5				
103	NB-IoT	FDD	757 70646	757.5 70651	758 70655	1	787 134282	787.5 134287	788 134291	-30			17.5							NB-IoT
106	900	FDD	935 70656	937.5 70681	940 70705	5	896 134292	898.5 134317	901 134341	39			18.2	1.4	3					
107	DL 600	SDL	612 70656	632 70856	652 71055	40	Downlink only					18.3	1.4	3					Broadcast	
108	DL 500	SDL	470 71056	584 72196	698 73335	228	Downlink only					18.3	1.4	3					Broadcast	

Nb = 71

APAC: Asia and Pacific

APT: Asia Pacific Telecommunity

CALA: Central America Latin America

CBRS: Citizens Broadband Radio Service 3550-3700 MHz

DD: Digital Dividend

EMEA: Europe Middle East and Africa

EU: Europe

NAR: North America Region

PAMR: Public Access Mobile Radio

PS: Public Safety

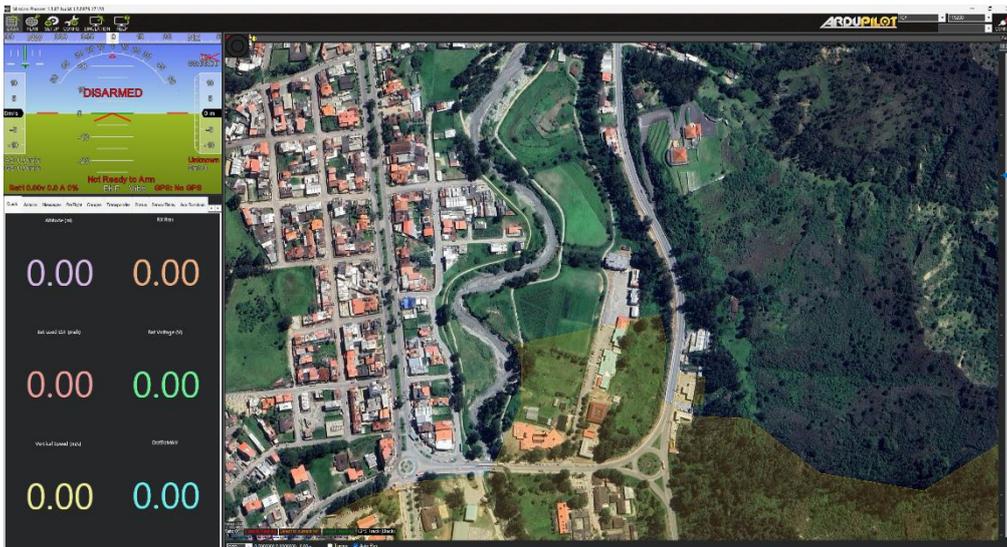
700 xy: See xy blocks [USA FCC](#)

+: Extended band

Anexo 2. Guía de configuración del UAV en Mission Planner

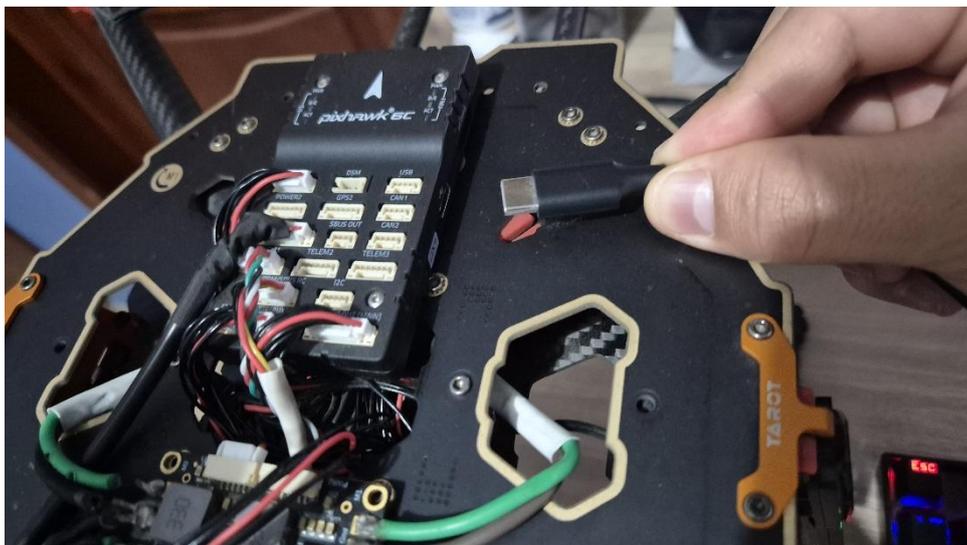
La siguiente guía de configuración servirá para una correcta configuración del UAV, se mostrará detalladamente cada proceso a seguir para una configuración exitosa de la controladora de vuelo y con ello todo el UAV.

Se requiere tener instalado el Software Mission Planner, el cual se encuentra en el siguiente link: <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-installation.html>

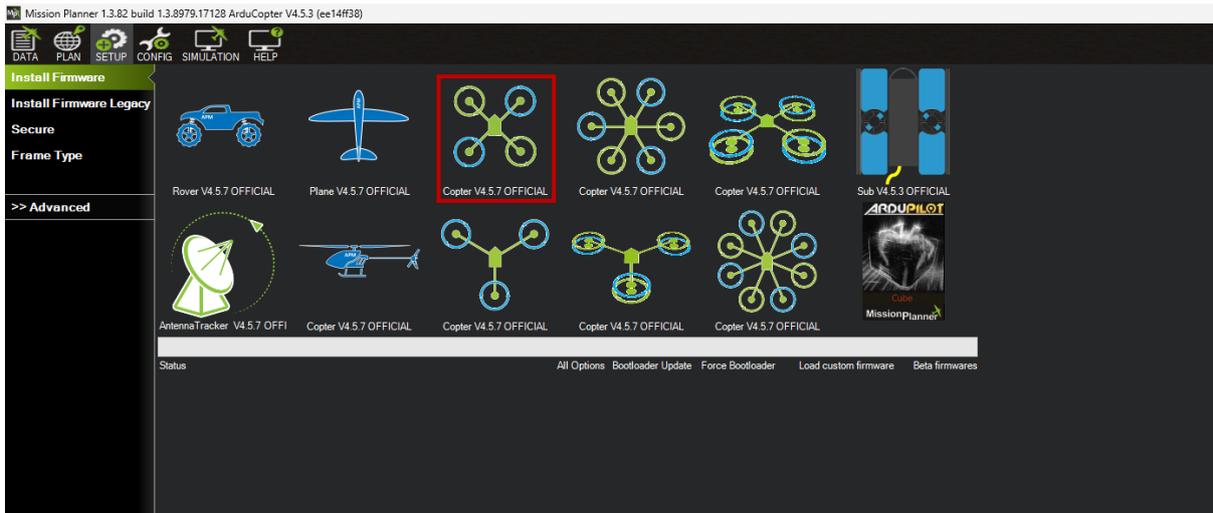


De esta forma se visualiza el software ya instalado correctamente en el ordenador.

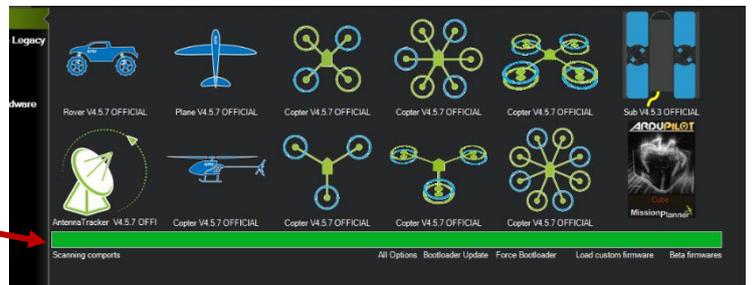
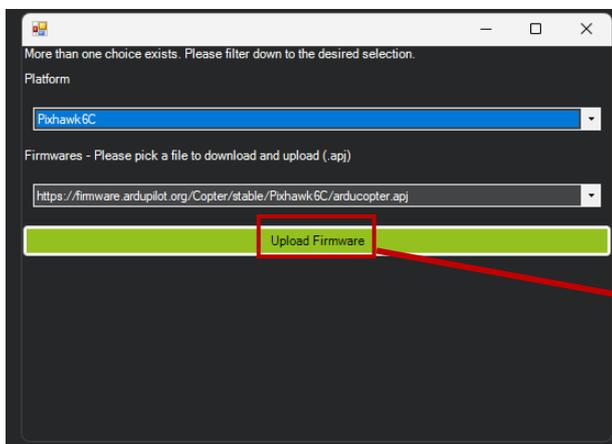
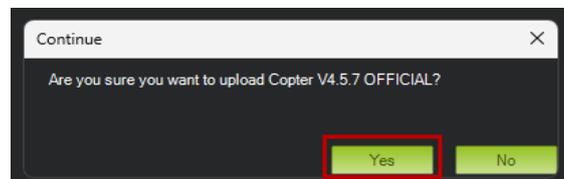
Se procede a conectar, mediante un cable USB tipo C, el ordenador con la controladora de vuelo Pixhawk 6C.



La controladora se encenderá y en el software se realizará lo siguiente en el menú “SETUP”, donde se procederá a instalar el firmware de copter para este caso en concreto.



Se selecciona Copter y se realiza lo siguiente:



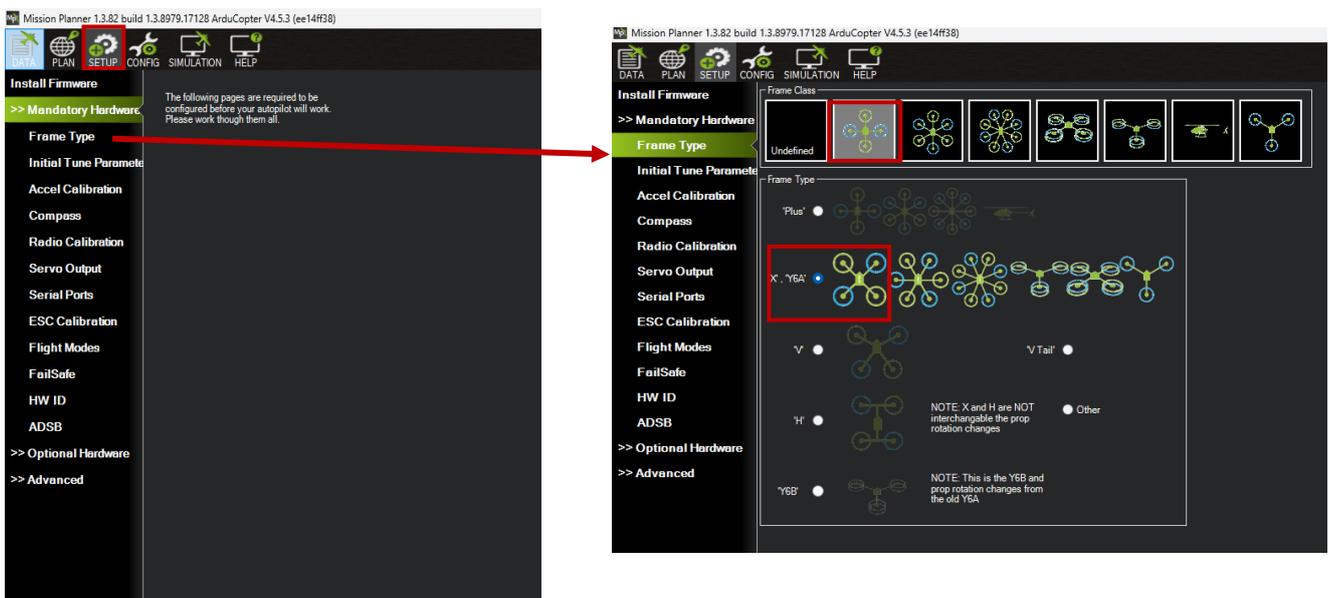
Se instala el firmware y este primer proceso culmina. Se procede a seleccionar un puerto com, posteriormente en “Conect”. Ya se habrá conectado la controladora de vuelo con el software. Inmediatamente se podrá observar en el mapa la ubicación actual debido a que el GPS ya está activo y transmitiendo.

Ya se encuentra listo para ir configurando cada uno de los puntos específicos.

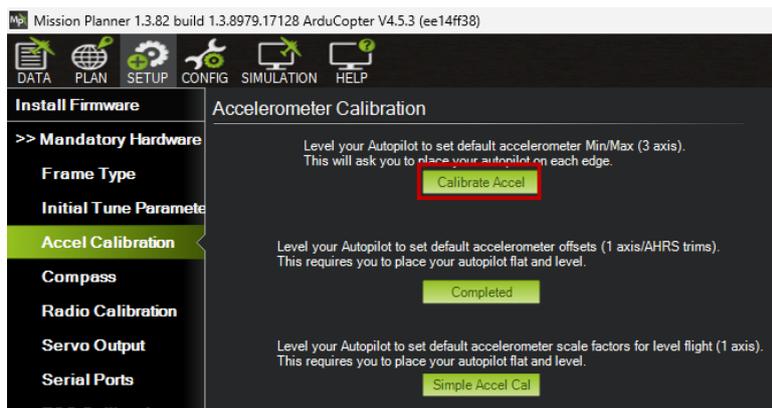


Seguidamente, en la parte superior izquierda se ubica la opción “SETUP” y se procederá a realizar un clic para desplegar el menú de opciones.

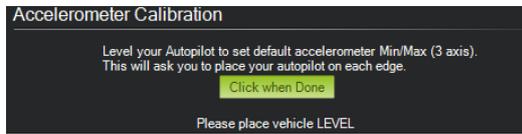
Se ingresa en “Mandatory Hardware” y se encontrarán las diferentes opciones para la configuración del UAV. En “Frame Type” se selecciona el tipo de estructura que se tiene, en este caso el tipo en X.



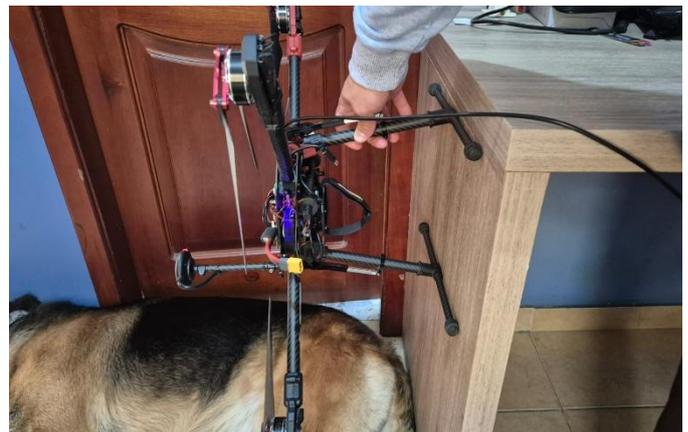
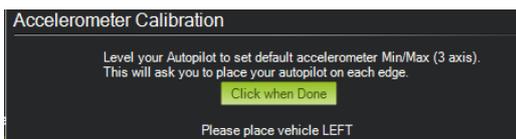
Seguidamente, en “Accel Calibration” se procederá a calibrar el acelerómetro, de la siguiente manera, se selecciona el que se muestra y se siguen los pasos a continuación:



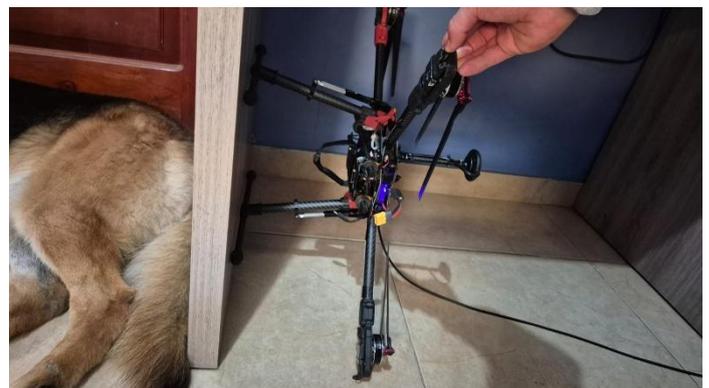
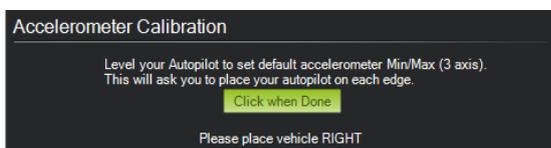
Se coloca el UAV en la posición que indica y se presiona clic cuando ya esté listo.



Una vez se presione en “Clic when Done”, una nueva posición deberá ser cumplida, en este caso hay que posicionar el UAV hacia la izquierda, siempre manteniendo la dirección de la controladora de vuelo hacia delante, ese será el punto de referencia. Se hizo uso de una superficie de apoyo para mayor precisión.



De la misma forma, ahora corresponde hacia la derecha.



Ahora hacia abajo, es decir que la controladora apunte hacia el piso.

Accelerometer Calibration

Level your Autopilot to set default accelerometer Min/Max (3 axis).
This will ask you to place your autopilot on each edge.

Click when Done

Please place vehicle NOSEDOWN



La controladora apuntando hacia arriba.

Accelerometer Calibration

Level your Autopilot to set default accelerometer Min/Max (3 axis).
This will ask you to place your autopilot on each edge.

Click when Done

Please place vehicle NOSEUP



Finalmente, totalmente dado la vuelta.

Accelerometer Calibration

Level your Autopilot to set default accelerometer Min/Max (3 axis).
This will ask you to place your autopilot on each edge.

Click when Done

Please place vehicle BACK



La calibración ha sido exitosa y se presenta el siguiente mensaje:

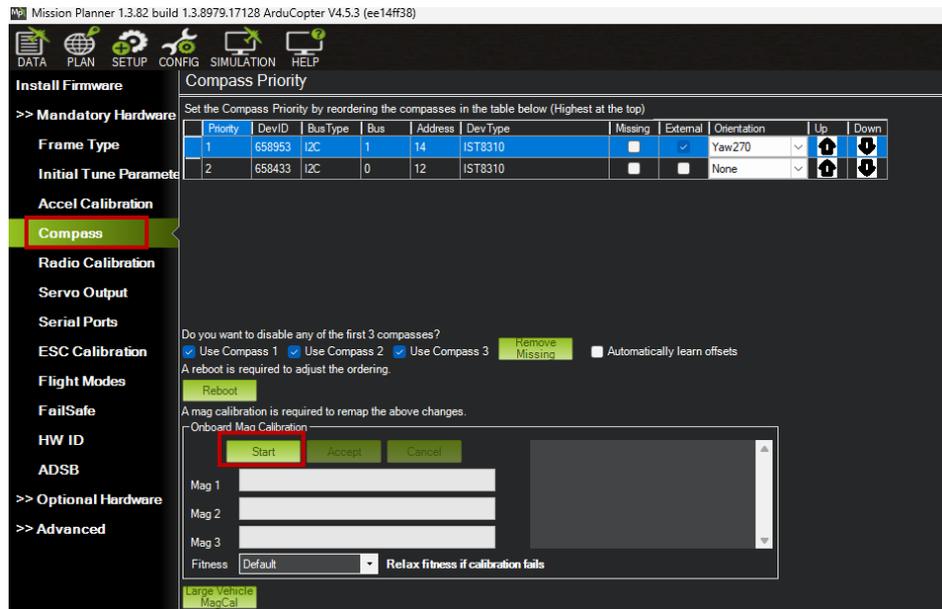
Accelerometer Calibration

Level your Autopilot to set default accelerometer Min/Max (3 axis).
This will ask you to place your autopilot on each edge.

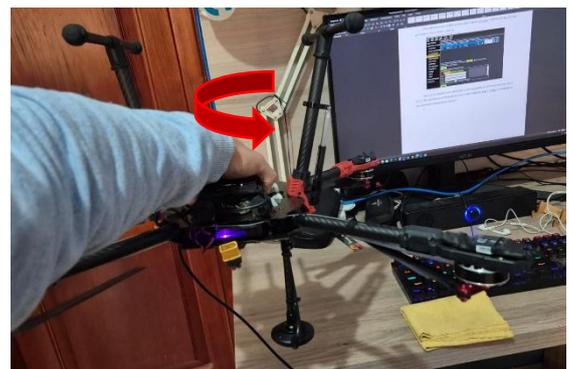
Done

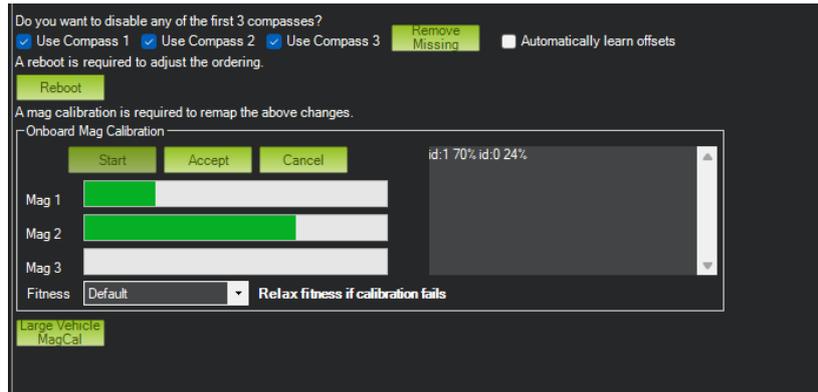
Calibration successful

Otra calibración que se debe llevar a cabo es la del Compass, es decir la brújula, lo cual sirve para su vuelo estable y preciso.



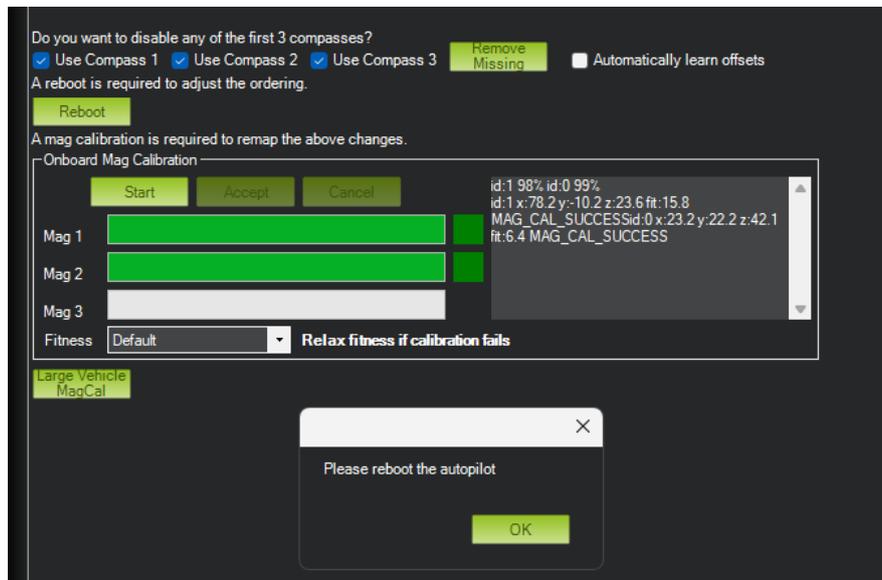
Para que se complete esta calibración se debe ir girando el UAV en los tres axis, en Z, X y Y. De esta forma se irá llenando de color verde la barra de Mag 1 y Mag 2, resultando en una calibración exitosa de los sensores.



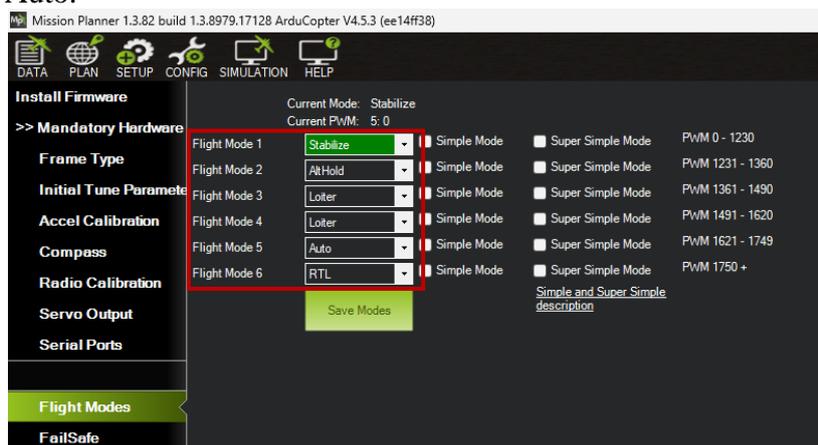


Al finalizar, el zumbador que viene incorporado en el GPS emitirá un sonido de finalización y que se ha calibrado con éxito.

Se deberá reiniciar la controladora de vuelo, es decir se procede a seleccionar “Reboot” y nuevamente se conecta a través del puerto com.



La siguiente configuración será seleccionar los modos de vuelo que se usarán en el UAV, en este caso se hizo uso del modo de vuelo manual (Stabilize), el modo de vuelo Alt Hold, Loiter y Auto.



De forma paralela, en la Transmisora, por defecto viene para que se puedan variar los modos de vuelo en el canal 5, se debe seleccionar con que Switch se los va a ir activando y el nombre del modo de vuelo que muestra la transmisora debe coincidir con el que se ve en misión planner para evitar confusiones.

Se presenta el proceso para seleccionar los modos de vuelo en la transmisora.



De este modo se puede elegir entre los diferentes modos de vuelo que la controladora de vuelo permite tener.

Con esto se concluye las configuraciones elementales para que el UAV cumpla su función de forma correcta estando listo para ser operado y testeado en los vuelos.

Anexo 3. Archivo de configuración epc.conf

```
#####
#                               srsEPC configuration file
#####

#####
# MME configuration
#
# mme_code:           8-bit MME code identifies the MME within a group.
# mme_group:         16-bit MME group identifier.
# tac:               16-bit Tracking Area Code.
# mcc:               Mobile Country Code
# mnc:               Mobile Network Code
# full_net_name      Display Name of the Network
# short_net_name     Short Display Name of the Network
# apn:               Set Access Point Name (APN)
# mme_bind_addr:     IP bind addr to listen for eNB S1-MME connections
# dns_addr:          DNS server address for the UEs
# encryption_algo:   Preferred encryption algorithm for NAS layer
#                   (supported: EEA0 (default), EEA1, EEA2, EEA3)
# integrity_algo:    Preferred integrity protection algorithm for NAS
#                   (supported: EIA0 (rejected by most UEs), EIA1 (default),
EIA2, EIA3)
# paging_timer:      Value of paging timer in seconds (T3413)
# request_imeisv:    Request UE's IMEI-SV in security mode command
# lac:               16-bit Location Area Code.
#
#####
[mme]
mme_code = 0x1a
mme_group = 0x0001
tac = 0x0007
mcc = 901
mnc = 70
mme_bind_addr = 127.0.1.100
apn = LTE
dns_addr = 8.8.8.8
encryption_algo = EEA0
integrity_algo = EIA1
paging_timer = 2
request_imeisv = false
lac = 0x0006

#####
# HSS configuration
#
# db_file:           Location of .csv file that stores UEs information.
#
#####
[hss]
db_file = user_db.csv

#####
# SP-GW configuration
#
# gtpu_bind_addr:    GTP-U bind address.
# sgi_if_addr:       SGi TUN interface IP address.
# sgi_if_name:       SGi TUN interface name.
# max_paging_queue: Maximum packets in paging queue (per UE).
#
#####

[spgw]
gtpu_bind_addr = 127.0.1.100
sgi_if_addr = 172.16.0.1
sgi_if_name = srs_spgw_sgi
max_paging_queue = 100
```

```

#####
# PCAP configuration
#
# Packets are captured to file in the compact format decoded by
# the Wireshark slap dissector and with DLT 150.
# To use the dissector, edit the preferences for DLT_USER to
# add an entry with DLT=150, Payload Protocol=slap.
#
# enable: Enable or disable the PCAP.
# filename: File name where to save the PCAP.
#
#####
[pcap]
enable = false
filename = /tmp/epc.pcap

#####
# Log configuration
#
# Log levels can be set for individual layers. "all_level" sets log
# level for all layers unless otherwise configured.
# Format: e.g. slap_level = info
#
# In the same way, packet hex dumps can be limited for each level.
# "all_hex_limit" sets the hex limit for all layers unless otherwise
# configured.
# Format: e.g. slap_hex_limit = 32
#
# Logging layers: nas, slap, mme_gtpc, spgw_gtpc, gtpu, spgw, hss, all
# Logging levels: debug, info, warning, error, none
#
# filename: File path to use for log output. Can be set to stdout
# to print logs to standard output
#####
[log]
all_level = info
all_hex_limit = 32
filename = /tmp/epc.log

#nas_level = debug
#slap_level = debug
#mme_gtpc_level = debug
#spgw_gtpc_level = debug
#gtpu_level = debug
#spgw_level = debug
#hss_level = debug

```

Anexo 4. Archivo de configuración enb.conf

```
#####
#                               srsENB configuration file
#####

#####
# eNB configuration
#
# enb_id:                20-bit eNB identifier.
# mcc:                   Mobile Country Code
# mnc:                   Mobile Network Code
# mme_addr:              IP address of MME for S1 connection
# gtp_bind_addr:         Local IP address to bind for GTP connection
# gtp_advertise_addr:   IP address of eNB to advertise for DL GTP-U Traffic
# s1c_bind_addr:        Local IP address to bind for S1AP connection
# s1c_bind_port:        Source port for S1AP connection (0 means any)
# n_prb:                 Number of Physical Resource Blocks (6,15,25,50,75,100)
# tm:                   Transmission mode 1-4 (TM1 default)
# nof_ports:            Number of Tx ports (1 port default, set to 2 for TM2/3/4)
#
#####
[enb]
enb_id = 0x19B
mcc = 901
mnc = 70
mme_addr = 127.0.1.100
gtp_bind_addr = 127.0.1.1
s1c_bind_addr = 127.0.1.1
s1c_bind_port = 0
n_prb = 15
tm = 4
nof_ports = 2

#####
# eNB configuration files
#
# sib_config:  SIB1, SIB2 and SIB3 configuration file
# note: When enabling MBMS, use the sib.conf.mbsfn configuration file which
# includes SIB13
# rr_config:   Radio Resources configuration file
# rb_config:   SRB/DRB configuration file
#####
[enb_files]
sib_config = sib.conf
rr_config = rr.conf
rb_config = rb.conf

#####
# RF configuration
#
# dl_earfcn: EARFCN code for DL (only valid if a single cell is configured in
# rr.conf)
# tx_gain: Transmit gain (dB).
# rx_gain: Optional receive gain (dB). If disabled, AGC if enabled
#
# Optional parameters:
# dl_freq:           Override DL frequency corresponding to dl_earfcn
# ul_freq:           Override UL frequency corresponding to dl_earfcn (must be
# set if dl_freq is set)
# device_name:      Device driver family
#                   Supported options: "auto" (uses first driver found), "UHD",
# "bladeRF", "soapy", "zmq" or "Sidekiq"
# device_args:      Arguments for the device driver. Options are "auto" or any
# string.
#                   Default for UHD:
"recv_frame_size=9232,send_frame_size=9232"
#                   Default for bladeRF: ""
```

```

# time_adv_nsamples: Transmission time advance (in number of samples) to
compensate for RF delay
#
#           from antenna to timestamp insertion.
#           Default "auto". B210 USRP: 100 samples, bladeRF: 27
#####
[rf]
#dl_earfcn = 3350
dl_earfcn = 1934

tx_gain = 100
rx_gain = 100

device_name = bladeRF

# For best performance in 2x2 MIMO and >= 15 MHz use the following device_args
settings:
#   USRP B210: num_recv_frames=64,num_send_frames=64
#   And for 75 PRBs, also append ",master_clock_rate=15.36e6" to the device
args

# For best performance when BW<5 MHz (25 PRB), use the following device_args
settings:
#   USRP B210: send_frame_size=512,recv_frame_size=512

#device_args = auto
#time_adv_nsamples = auto

#device_args = num_recv_frames=64,num_send_frames=64,master_clock_rate=15.36e6
#time_adv_nsamples = auto

# Example for ZMQ-based operation with TCP transport for I/Q samples
#device_name = zmq
#device_args =
fail_on_disconnect=true,tx_port=tcp://*:2000,rx_port=tcp://localhost:2001,id=enb,
base_srate=23.04e6

#####
# Packet capture configuration
#
# MAC-layer packets are captured to a file in the compact format which can
# be decoded by Wireshark. For decoding, use the UDP dissector and the UDP
# heuristic dissection. Edit the preferences (Edit > Preferences >
# Protocols > DLT_USER) for DLT_USER to add an entry for DLT=149 with
# Protocol=udp. Further, enable the heuristic dissection in UDP under:
# Analyze > Enabled Protocols > MAC-LTE > mac_lte_udp and MAC-NR > mac_nr_udp
# For more information see: https://wiki.wireshark.org/MAC-LTE
# Configuring this Wireshark preferences is needed for decoding the MAC PCAP
# files as well as for the live network capture option.
#
# Please note that this setting will by default only capture MAC
# frames on dedicated channels, and not SIB. You have to build with
# WRITE_SIB_PCAP enabled in srsenb/src/stack/mac/mac.cc if you want
# SIB to be part of the MAC pcap file.
#
# S1AP Packets are captured to a file in the compact format which can
# be decoded by the Wireshark s1ap dissector with DLT 150.
# To use the dissector, edit the preferences for DLT_USER to
# add an entry with DLT=150, Payload Protocol=s1ap.
#
# enable:           Enable MAC layer packet captures (true/false)
# filename:         File path to use for LTE MAC packet captures
# nr_filename:      File path to use for NR MAC packet captures
# s1ap_enable:      Enable or disable the PCAP.
# s1ap_filename:   File name where to save the PCAP.

```

```

#
# mac_net_enable: Enable MAC layer packet captures sent over the network
# (true/false default: false)
# bind_ip: Bind IP address for MAC network trace (default: "0.0.0.0")
# bind_port: Bind port for MAC network trace (default: 5687)
# client_ip: Client IP address for MAC network trace (default: "127.0.0.1")
# client_port Client IP address for MAC network trace (default: 5847)
#####
[pcap]
#enable = false
#filename = /tmp/enb_mac.pcap
#nr_filename = /tmp/enb_mac_nr.pcap
#s1ap_enable = false
#s1ap_filename = /tmp/enb_s1ap.pcap

#mac_net_enable = false
#bind_ip = 0.0.0.0
#bind_port = 5687
#client_ip = 127.0.0.1
#client_port = 5847

#####
# Log configuration
#
# Log levels can be set for individual layers. "all_level" sets log
# level for all layers unless otherwise configured.
# Format: e.g. phy_level = info
#
# In the same way, packet hex dumps can be limited for each level.
# "all_hex_limit" sets the hex limit for all layers unless otherwise
# configured.
# Format: e.g. phy_hex_limit = 32
#
# Logging layers: rf, phy, phy_lib, mac, rlc, pdcp, rrc, gtpu, s1ap, stack, all
# Logging levels: debug, info, warning, error, none
#
# filename: File path to use for log output. Can be set to stdout
#           to print logs to standard output
# file_max_size: Maximum file size (in kilobytes). When passed, multiple files
# are created.
#           If set to negative, a single log file will be created.
#####
[log]
all_level = warning
all_hex_limit = 32
filename = /tmp/enb.log
file_max_size = -1

[gui]
enable = false

#####
# Scheduler configuration options
#
# sched_policy:      User MAC scheduling policy (E.g. time_rr, time_pf)
# min_aggr_level:   Optional minimum aggregation level index (l=log2(L) can be
# 0, 1, 2 or 3)
# max_aggr_level:   Optional maximum aggregation level index (l=log2(L) can be
# 0, 1, 2 or 3)
# adaptive_aggr_level: Boolean flag to enable/disable adaptive aggregation level
# based on target BLER
# pdsch_mcs:        Optional fixed PDSCH MCS (ignores reported CQIs if
# specified)
# pdsch_max_mcs:    Optional PDSCH MCS limit
# pusch_mcs:        Optional fixed PUSCH MCS (ignores reported CQIs if
# specified)

```

```

# pusch_max_mcs:      Optional PUSCH MCS limit
# min_nof_ctrl_symbols: Minimum number of control symbols
# max_nof_ctrl_symbols: Maximum number of control symbols
# pucch_multiplex_enable: Allow PUCCH HARQ to collide with PUSCH and other PUCCH
# pucch_harq_max_rb: Maximum number of RB to be used for PUCCH on the edges of
the grid.
#
#           If defined and greater than 0, the scheduler will avoid DL
PDCCH allocations if
#
#           PUCCH HARQ falls outside this region
# target_bler:      Target BLER (in decimal) to achieve via adaptive link
# max_delta_dl_cqi: Maximum shift in CQI for adaptive DL link
# max_delta_ul_snr: Maximum shift in UL SNR for adaptive UL link
# adaptive_dl_mcs_step_size: Step size or learning rate used in adaptive DL MCS
link
# adaptive_ul_mcs_step_size: Step size or learning rate used in adaptive UL MCS
link
# min_tpc_tti_interval: Minimum TTI interval between TPCs different than 1
# ul_snr_avg_alpha: Exponential Average alpha coefficient used in estimation of
UL SNR
# init_ul_snr_value: Initial UL SNR value used for computing MCS in the first UL
grant
# init_dl_cqi:      DL CQI value used before any CQI report is available to the
eNB
# max_sib_coderate: Upper bound on SIB and RAR grants coderate
# pdcch_cqi_offset: CQI offset in derivation of PDCCH aggregation level
# nr_pdsch_mcs:     Optional fixed NR PDSCH MCS (ignores reported CQIs if
specified)
# nr_pusch_mcs:     Optional fixed NR PUSCH MCS (ignores reported CQIs if
specified)
#
#####
[scheduler]
#policy      = time_pf
#policy_args = 2
#min_aggr_level  = 0
#max_aggr_level  = 3
#adaptive_aggr_level = false
#pdsch_mcs      = -1
#pdsch_max_mcs  = -1
#pusch_mcs      = -1
#pusch_max_mcs  = 16
#min_nof_ctrl_symbols = 1
#max_nof_ctrl_symbols = 3
#pucch_multiplex_enable = false
#pucch_harq_max_rb = 0
#target_bler    = 0.05
#max_delta_dl_cqi = 5
#max_delta_ul_snr = 5
#adaptive_dl_mcs_step_size = 0.001
#adaptive_ul_mcs_step_size = 0.001
#min_tpc_tti_interval = 1
#ul_snr_avg_alpha=0.05
#init_ul_snr_value=5
#init_dl_cqi=5
#max_sib_coderate=0.3
#pdcch_cqi_offset=0
#nr_pdsch_mcs=28
#nr_pusch_mcs=28

#####
# Slicing configuration
# enable_eMBB      Enables enhanced mobile broadband (eMBB) slice in the
gNodeB
# enable_URLLC     Enables Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC)
slice in the gNodeB
# enable_MIoT      Enables Massive Internet of Things (MIoT) slice in the

```

```

gNodeB
# eMBB_sd          eMBB slice differentiator
# URLLC_sd         URLLC slice differentiator
# MIoT_sd          MIoT slice differentiator
#####
[slicing]
#enable_eMBB = false
#enable_URLLC = false
#enable_MIoT = false
#eMBB_sd = 1
#URLLC_sd = 1
#MIoT_sd = 1

#####
# eMBMS configuration options
#
# enable:          Enable MBMS transmission in the eNB
# m1u_multiaddr:  Multicast address the M1-U socket will register to
# m1u_if_addr:    Address of the interface the M1-U interface will listen
to for multicast packets
# mcs:            Modulation and Coding scheme for MBMS traffic
#
#####
[embms]
#enable = false
#m1u_multiaddr = 239.255.0.1
#m1u_if_addr = 127.0.1.201
#mcs = 20

#####
# Channel emulator options:
# enable:          Enable/disable internal Downlink/Uplink channel emulator
#
# -- AWGN Generator
# awgn.enable:    Enable/disable AWGN generator
# awgn.snr:       Target SNR in dB
#
# -- Fading emulator
# fading.enable:  Enable/disable fading simulator
# fading.model:   Fading model + maximum doppler (E.g. none, epa5, eva70,
etu300, etc)
#
# -- Delay Emulator      delay(t) = delay_min + (delay_max - delay_min) * (1 +
sin(2pi*t/period)) / 2
#                      Maximum speed [m/s]: (delay_max - delay_min) * pi * 300 /
period
# delay.enable:    Enable/disable delay simulator
# delay.period_s: Delay period in seconds
# delay.init_time_s: Delay initial time in seconds
# delay.maximum_us: Maximum delay in microseconds
# delay.minumum_us: Minimum delay in microseconds
#
# -- Radio-Link Failure (RLF) Emulator
# rlf.enable:     Enable/disable RLF simulator
# rlf.t_on_ms:    Time for On state of the channel (ms)
# rlf.t_off_ms:   Time for Off state of the channel (ms)
#
# -- High Speed Train Doppler model simulator
# hst.enable:     Enable/disable HST simulator
# hst.period_s:   HST simulation period in seconds
# hst.fd_hz:      Doppler frequency in Hz
# hst.init_time_s: Initial time in seconds
#####
[channel.dl]

```

```

#enable          = false

[channel.dl.awgn]
#enable          = false
#snr              = 30

[channel.dl.fading]
#enable          = false
#model           = none

[channel.dl.delay]
#enable          = false
#period_s        = 3600
#init_time_s     = 0
#maximum_us      = 100
#minimum_us      = 10

[channel.dl.rlf]
#enable          = false
#t_on_ms         = 10000
#t_off_ms        = 2000

[channel.dl.hst]
#enable          = false
#period_s        = 7.2
#fd_hz           = 750.0
#init_time_s     = 0.0

[channel.ul]
#enable          = false

[channel.ul.awgn]
#enable          = false
#n0              = -30

[channel.ul.fading]
#enable          = false
#model           = none

[channel.ul.delay]
#enable          = false
#period_s        = 3600
#init_time_s     = 0
#maximum_us      = 100
#minimum_us      = 10

[channel.ul.rlf]
#enable          = false
#t_on_ms         = 10000
#t_off_ms        = 2000

[channel.ul.hst]
#enable          = false
#period_s        = 7.2
#fd_hz           = -750.0
#init_time_s     = 0.0

#####
# CFR configuration options
#
# The CFR module provides crest factor reduction for the transmitted signal.
#
# enable:          Enable or disable the CFR. Default: disabled
#
# mode:           manual:  CFR threshold is set by cfr_manual_thres (default).
#                   auto_ema: CFR threshold is adaptive based on the signal PAPR.

```

```

Power avg. with Exponential Moving Average.
#           The time constant of the averaging can be tweaked
with the ema_alpha parameter.
#           auto_cma: CFR threshold is adaptive based on the signal PAPR.
Power avg. with Cumulative Moving Average.
#           Use with care, as CMA's increasingly slow response
may be unsuitable for most use cases.
#
# strength:      Ratio between amplitude-limited vs unprocessed signal (0 to
1). Default: 1
# manual_thres:  Fixed manual clipping threshold for CFR manual mode. Default:
0.5
# auto_target_papr: Signal PAPR target (in dB) in CFR auto modes. output PAPR can
be higher due to peak smoothing. Default: 8
# ema_alpha:     Alpha coefficient for the power average in auto_ema mode.
Default: 1/7
#
#####
[cfrr]
#enable          = false
#mode            = manual
#manual_thres    = 0.5
#strength        = 1
#auto_target_papr = 8
#ema_alpha       = 0.0143

# E2 Agent configuration options
#
# ric_ip:        IP address of the RIC controller
# ric_port:      Port of the RIC controller
# ric_bind_ip:   Local IP address to bind for RIC connection
# ric_bind_port: Local port to bind for RIC connection
# max_ric_setup_retries: Maximum amount of retries to setup the RIC connection.
If this value is exceeded, an alarm is written to the log. -1 means infinity.
# ric_connect_timer: Connection Retry Timer for RIC connection (seconds)
#####
[e2_agent]
#enable = false
#ric_ip = 127.0.0.1
#ric_port = 36421
#ric_bind_ip = 127.0.0.1
#ric_bind_port = 36425
#max_ric_setup_retries = -1
#ric_connect_timer = 10

#####
# Expert configuration options
#
# pusch_max_its:      Maximum number of turbo decoder iterations (default: 4)
# nr_pusch_max_its:   Maximum number of LDPC iterations for NR (Default 10)
# pusch_8bit_decoder: Use 8-bit for LLR representation and turbo decoder
trellis computation (experimental)
# nof_phy_threads:    Selects the number of PHY threads (maximum: 4, minimum:
1, default: 3)
# metrics_period_secs: Sets the period at which metrics are requested from the
eNB
# metrics_csv_enable: Write eNB metrics to CSV file.
# metrics_csv_filename: File path to use for CSV metrics
# report_json_enable: Write eNB report to JSON file (default: disabled)
# report_json_filename: Report JSON filename (default: /tmp/enb_report.json)
# report_json_asn1_oct: Prints ASN1 messages encoded as an octet string instead
of plain text in the JSON report file
# alarms_log_enable:  Enable Alarms logging (default: disabled)
# alarms_filename:   Alarms logging filename (default: /tmp/alarms.log)
# tracing_enable:    Write source code tracing information to a file
# tracing_filename:  File path to use for tracing information

```

```

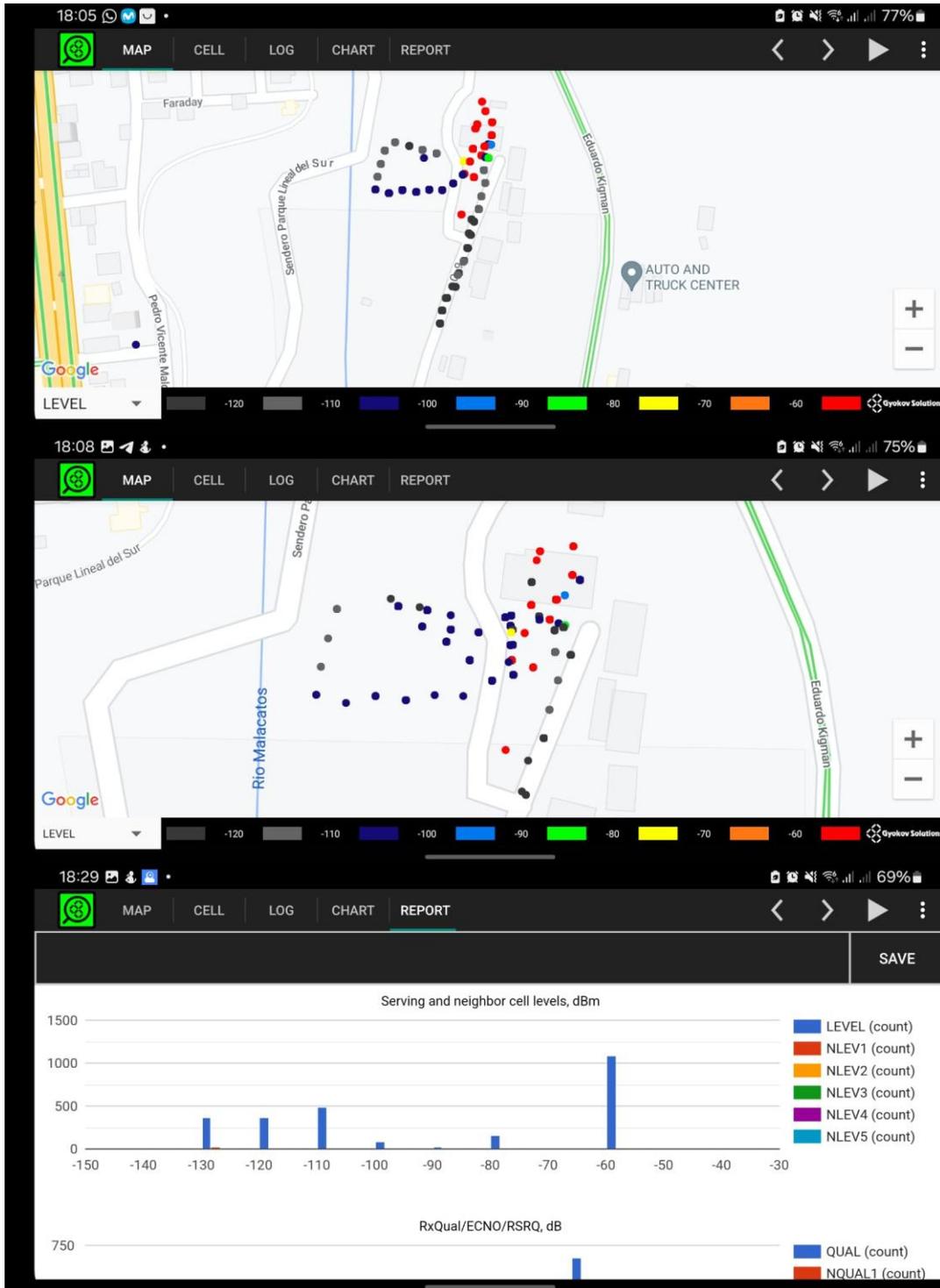
# tracing_buffcapacity: Maximum capacity in bytes the tracing framework can store
# stdout_ts_enable: Prints once per second the timestamp into stdout
# tx_amplitude: Transmit amplitude factor (set 0-1 to reduce PAPR)
# rrc_inactivity_timer Inactivity timeout used to remove UE context from RRC (in
milliseconds)
# max_mac_dl_kos: Maximum number of consecutive KOs in DL before triggering
the UE's release (default: 100)
# max_mac_ul_kos: Maximum number of consecutive KOs in UL before triggering
the UE's release (default: 100)
# max_prach_offset_us: Maximum allowed RACH offset (in us)
# nof_prealloc_ues: Number of UE memory resources to preallocate during eNB
initialization for faster UE creation (default: 8)
# rlf_release_timer_ms: Time taken by eNB to release UE context after it detects
an RLF
# eea_pref_list: Ordered preference list for the selection of encryption
algorithm (EEA) (default: EEA0, EEA2, EEA1)
# eia_pref_list: Ordered preference list for the selection of integrity
algorithm (EIA) (default: EIA2, EIA1, EIA0)
# gtpu_tunnel_timeout: Time that GTPU takes to release indirect forwarding
tunnel since the last received GTPU PDU (0 for no timer)
# ts1_reloc_prep_timeout: S1AP TS 36.413 TS1RelocPrep Expiry Timeout value in
milliseconds
# ts1_reloc_overall_timeout: S1AP TS 36.413 TS1RelocOverall Expiry Timeout value
in milliseconds
# rlf_release_timer_ms: Time taken by eNB to release UE context after it detects
a RLF
# rlf_min_ul_snr_estim: SNR threshold in dB below which the enb is notified with
RLF ko
# s1_setup_max_retries: Maximum amount of retries to setup the S1AP connection.
If this value is exceeded, an alarm is written to the log. -1 means infinity.
# s1_connect_timer: Connection Retry Timer for S1 connection (seconds)
# rx_gain_offset: RX Gain offset to add to rx_gain to calibrate RSRP
readings
# use_cedron_f_est_alg: Whether to use Cedron algorithm for TA estimation or not
(Default: false)
#####
[expert]
#pusch_max_its = 8 # These are half iterations
#nr_pusch_max_its = 10
#pusch_8bit_decoder = false
#nof_phy_threads = 3
#metrics_period_secs = 1
#metrics_csv_enable = false
#metrics_csv_filename = /tmp/enb_metrics.csv
#report_json_enable = true
#report_json_filename = /tmp/enb_report.json
#report_json_asn1_oct = false
#alarms_log_enable = true
#alarms_filename = /tmp/enb_alarms.log
#tracing_enable = true
#tracing_filename = /tmp/enb_tracing.log
#tracing_buffcapacity = 1000000
#stdout_ts_enable = false
#tx_amplitude = 0.6
#rrc_inactivity_timer = 30000
#max_mac_dl_kos = 100
#max_mac_ul_kos = 100
#max_prach_offset_us = 30
#nof_prealloc_ues = 8
#rlf_release_timer_ms = 4000
#lcid_padding = 3
#eea_pref_list = EEA0, EEA2, EEA1
#eia_pref_list = EIA2, EIA1, EIA0
#gtpu_tunnel_timeout = 0
#extended_cp = false
#ts1_reloc_prep_timeout = 10000

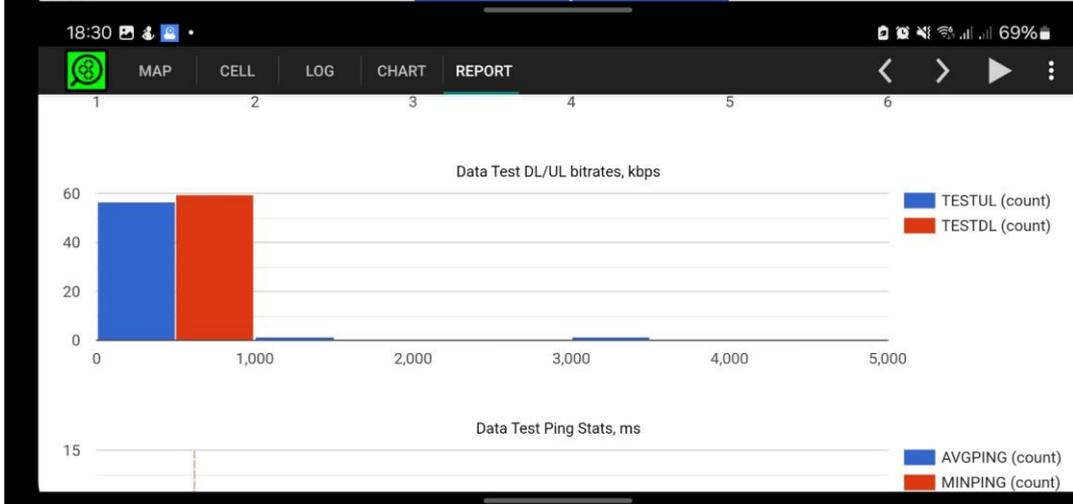
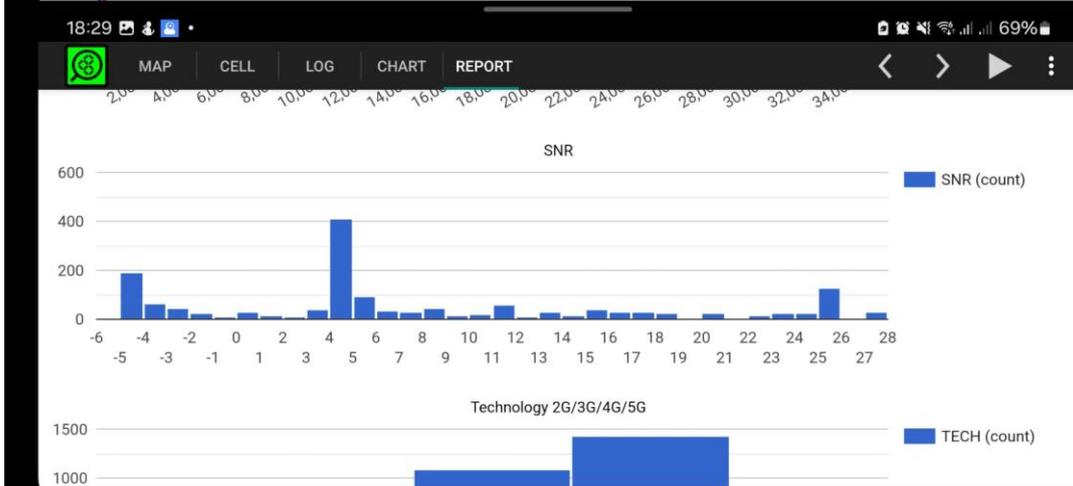
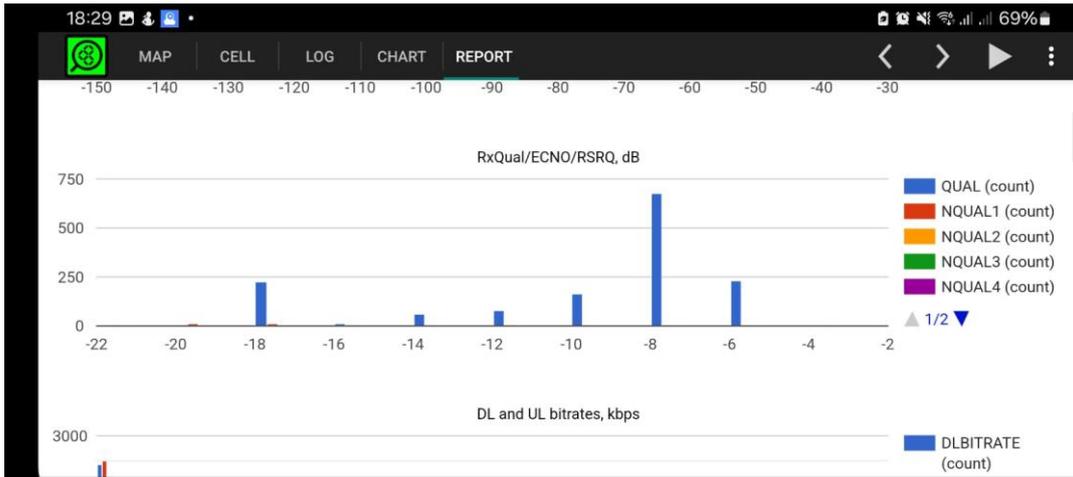
```

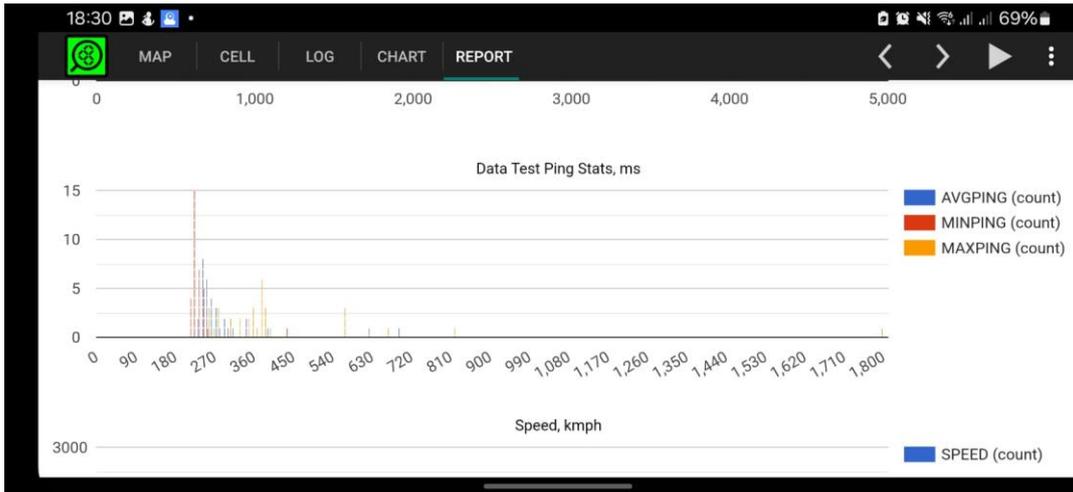
```
#ts1_reloc_overall_timeout = 10000
#rlf_release_timer_ms = 4000
#rlf_min_ul_snr_estim = -2
#s1_setup_max_retries = -1
#s1_connect_timer = 10
#rx_gain_offset = 62
#mac_prach_bi = 0
#use_cedron_f_est_alg = false
```

Anexo 5. Mapas de cobertura por la aplicación G-NetView Pro

Con la aplicación G-NetView Pro se pudo tener cierto análisis sobre la conectividad con la red LTE.







Anexo 6. Certificado de traducción del resumen



Loja, 02 de agosto de 2024

Lic. Karina Yajaira Martínez Luzuriaga

LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN MENCIÓN INGLÉS

CERTIFICO:

Yo, Karina Yajaira Martínez Luzuriaga con cédula de identidad Nro. 1104902679, **Licenciada en Ciencias de la Educación Mención Inglés** por la Universidad Técnica Particular de Loja, con número de registro 1031-2022-2574017 en la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, señalo que el presente documento es fiel traducción del idioma español al idioma inglés del resumen del Trabajo de Integración Curricular denominado **Diseño e implementación de un sistema de comunicación móvil de emergencia para solventar la falta de conectividad utilizando un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV).**, elaborado por el Sr. Vicente Xavier Arias González, con cédula de identidad Nro. 1105372443, estudiante de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Nacional de Loja.



Lic. Karina Yajaira Martínez Luzuriaga

C.I. 1104902679

REGISTRO SENESCYT N°: 1031-2022-2574017