

TRABAJO DE FIN DE GRADO

INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

Planificación, despliegue, y validación
operacional de una red IoT basada en LoRa
para la monitorización masiva de sensores a
nivel de Campus

Autora: Dña. Daria Bakteeva Díaz-Piñeiro

Tutor: D. Ignacio Rodríguez Larrad

Cotutor: D. Ramón Rubio García

Febrero 2024

Resumen

El presente proyecto plantea la planificación, el despliegue y la validación operacional de una red LoRaWAN en el campus de Gijón de la Universidad de Oviedo y el Centro de Formación Profesional Revillagigedo de Gijón con el fin de cubrir la creciente demanda de una infraestructura tecnológica avanzada.

El despliegue final de la red incorpora los siguientes *gateways*, cada uno ubicado estratégicamente:

- Nodo *outdoor*, situado en la azotea del Dpto. Oeste, Módulo 3, desplegado en Noviembre del 2023. Los resultados de las medidas de la validación respaldan el correcto funcionamiento del *gateway* que llega a cubrir un área de aproximadamente 2.3 km.
- Nodo *outdoor*, ubicado en la azotea del Centro FP de Revillagigedo, lleva en correcto funcionamiento desde Julio del 2023. Las mediciones de la señal demuestran el satisfactorio rendimiento del *gateway* que proporciona cobertura hasta 2.5 km.
- Nodo *indoor*, emplazado en el Laboratorio 5G, Planta 1, Ed. Polivalente y desplegado en Septiembre del 2023. Según lo estudiado, ofrece una cobertura interior excelente, tanto para la planta principal como para la planta baja del edificio. Asimismo, se detecta su señal *outdoor* incluso a 1.5 km de distancia.
- Nodo *indoor*, localizado en MediaLab, Planta 3, Ed. Polivalente, lleva en correcto funcionamiento desde Septiembre del 2021. La validación demuestra que el *gateway* provee una excelente cobertura para las plantas superiores del edificio, además de provisionar cobertura *outdoor* a una distancia de 2 km.

La cobertura global de la red presenta valores de RSSI entre -61 dBm y -140 dBm, y valores de SNR entre -8.75 dB y 9 dB, estando la mayoría por encima de 4 dB, lo que garantiza una eficiente calidad esperada del servicio.

La red desplegada ya ha sido utilizada con éxito en varias actividades y proyectos. El diseño de un dispositivo para predecir inundaciones en el campus de Gijón, desarrollado por el grupo LPWAN, o la implementación de un dispositivo “Smart Object” fruto de un proyecto colaborativo representan sólo un inicio de una nueva era de renovación tecnológica del campus de Gijón.

Tabla de contenido

Resumen	3
1. Introducción.....	11
2. Motivación.....	13
3. Objetivos y alcance.....	15
4. Marco teórico.....	17
4.1. Internet of Things (IoT).....	17
4.2. Tecnología LPWAN	19
4.3. LoRa (Long Range).....	20
4.4. Radiopropagación.....	23
5. Desarrollo	25
5.1. Scouting de las posibles localizaciones de despliegue	25
5.1.1. Resumen de las posibles localizaciones	27
5.2. Arquitectura de red	28
5.3. Despliegue final.....	30
5.3.1. Despliegue Outdoor	31
5.3.2. Despliegue Indoor	37
5.3.3. Resumen del despliegue	40
6. Validación operativa de la red	41
6.1. Diseño del dispositivo medidor de cobertura	41
6.1.1. <i>Hardware</i> del dispositivo	42
6.1.2. Software del dispositivo	47
6.2. Resultados: Mapas de calor	49
6.2.1. Mediciones <i>Outdoor</i>	49
6.2.2. Mediciones <i>Indoor</i>	53
6.2.3. Resumen de las mediciones de cobertura	62

6.3.	Usos satisfactorios de la red	63
6.3.1.	Despliegue satisfactorio de dispositivos finales	63
6.3.2.	Análisis de cobertura en TTN Mapper	65
6.3.2.1.	<i>Gateway Outdoor</i> – Dpto. Oeste	65
6.3.2.2.	<i>Gateway Outdoor</i> – Revillagigedo	66
6.3.2.3.	<i>Gateway Indoor</i> – Laboratorio 5G	67
6.3.2.4.	<i>Gateway Indoor</i> – MediaLab.....	68
7.	Conclusiones.....	69
7.1.	Consideraciones futuras.....	70
8.	Referencias	72

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Representación de los dispositivos conectados a Internet en los últimos años	18
Ilustración 2 Calculadora Airtime, relación SF - data rate - duty cycle para la banda EU868-870 MHz	20
Ilustración 3 LoRa vs LoRaWAN	21
Ilustración 4 Arquitectura de red implementada en el campus de Gijón.....	28
Ilustración 5 Trayectoria del flujo de datos, desde el sensor hasta el backend	29
Ilustración 6 Ubicaciones de los gateways de la red, registro en TTN	29
Ilustración 7 Fotografía aérea (Google Maps) con las ubicaciones de los gateways en la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón	31
Ilustración 8 Fotografía aérea (Google Maps) con la ubicación del gateway en el Centro de Formación Profesional Revillagigedo	31
Ilustración 9 Despliegue del Gateway en el Centro FP Revillagigedo.....	32
Ilustración 10 Plano Ed. Dpto. Oeste (arriba). Ubicación del gateway exterior, Terraza Módulo 3	33
Ilustración 11 Instalación fallida en la terraza del Módulo 3.	34
Ilustración 13 Daños en el cable Ethernet	34
Ilustración 12 Daños en el inyector PoE	34
Ilustración 14 Instalación definitiva del gateway outdoor en el Dpto. Oeste, Módulo 3 (1)	35
Ilustración 15 Instalación definitiva del gateway outdoor en el Dpto. Oeste, Módulo 3 (2)	36
Ilustración 16 Plano Ed. Polivalente (a la izquierda). Ubicación del gateway interior, Cátedra Thin5G	37
Ilustración 17 Instalación del gateway indoor, Laboratorio 5G	38
Ilustración 18 Ubicación del Gateway situado en el Laboratorio de MediaLab	39
Ilustración 19 Instalación del gateway indoor, MediaLab	39
Ilustración 20 LilyGo LoRa32 v2.6.....	42
Ilustración 21 Esquemático	43
Ilustración 22 Diseño de la PCB, vista 3D	43

Ilustración 23 Dispositivo montado sobre la PCB	44
Ilustración 24 Diseño de la parte superior de la carcasa, 3D (a la izquierda) y parte inferior de la carcasa, 3D (a la derecha)	44
Ilustración 25 Diseño final, 3D.....	45
Ilustración 26 Prototipo de carcasa impresa en 3D, las dos partes son vistas por dentro ...	45
Ilustración 27 Ensamblaje final del prototipo	46
Ilustración 28 Diagrama de flujo del programa, implementación por hilos	48
Ilustración 29 RSSI - Outdoor del Campus de Gijón	50
Ilustración 30 SNR - Outdoor del Campus de Gijón.....	50
Ilustración 31 RSSI Outdoor - zona Revillagigedo	52
Ilustración 32 SNR Outdoor - zona Revillagigedo.....	52
Ilustración 33 RSSI Indoor - Ed. Polivalente Planta 1	54
Ilustración 34 SNR Indoor - Ed. Polivalente Planta 1	54
Ilustración 35 RSSI Indoor - Ed. Polivalente Planta 0	56
Ilustración 36 SNR Indoor - Ed. Polivalente Planta 0.....	56
Ilustración 37 RSSI Indoor - Dpto. Oeste, Planta 1.....	57
Ilustración 38 SNR Indoor - Dpto. Oeste, Planta 1	57
Ilustración 39 RSSI Indoor - Escuela de Marina, Planta 1	58
Ilustración 40 SNR Indoor - Escuela de Marina, Planta 1.....	58
Ilustración 41 RSSI Indoor - Aulario Norte, Planta 1	59
Ilustración 42 SNR Indoor - Aulario Norte, Planta 1	59
Ilustración 43 RSSI Indoor - Aulario Sur, Planta 1	60
Ilustración 44 SNR Indoor - Aulario Sur, Planta 1	60
Ilustración 45 RSSI Indoor - Dpto. Este, Planta 1	61
Ilustración 46 SNR Indoor – Dpto. Este, Planta 1.....	61
Ilustración 47 Despliegue del dispositivo encargado de medir el nivel del río (MediaLab - LPWAN).....	63
Ilustración 48 Despliegue del dispositivo "Smart Object" (Proyecto colaborativo, Ing. Mecánica, Ing. Telecomunicaciones, Máster Ing. Telecomunicación)	64
Ilustración 49 Beams del Gateway Outdoor, Campus de Gijón.....	65
Ilustración 50 Beams del Gateway Outdoor Revillagigedo	66
Ilustración 51 Beams del Gateway Indoor – Laboratorio 5G.....	67

Ilustración 52 Beams del Gateway Indoor MediaLab 68

Índice de tablas

Tabla 1 Ubicaciones consideradas para el despliegue	27
Tabla 2 Resumen de <i>gateways</i> desplegados	40
Tabla 3 Resumen de los valores máximos y mínimos de cobertura medidos	62

1. Introducción

En el dinámico y siempre evolutivo campo de la Ingeniería, la innovación y la aplicación de tecnologías emergentes desempeñan un papel fundamental en la resolución de desafíos. En este contexto, el presente proyecto se sitúa en la vanguardia de la investigación y desarrollo al abordar el diseño y el despliegue de una red *LoRa* (Long Range) multi-nodo en el Campus de Gijón de la Universidad de Oviedo.

El propósito central de este trabajo es trascender las fronteras de lo convencional, al enfocarse en la implementación y puesta en marcha de una infraestructura tecnológica avanzada. Dicha infraestructura, compuesta por nodos de red y sensores *IoT* (Internet of Things), tiene un objetivo claro: habilitar la recopilación automática de datos de múltiples sensores distribuidos en diferentes áreas del campus. Pero más allá de la simple recopilación de datos, el propósito es proporcionarle a la Universidad de Oviedo un sistema de monitorización y análisis de datos para las labores tanto de docencia como de investigación. Del mismo modo, el despliegue de la red permitirá a la Universidad optimizar la recolección de la información de los sensores y así, optimizar el funcionamiento del campus.

Los objetivos de este proyecto no sólo abarcan la planificación y el despliegue de la red *LoRa* y el dispositivo de medición, sino que también sirven como base para la integración con plataformas de análisis de datos y permitirá en un futuro las colaboraciones con otras instituciones que estén interesadas en el uso de esta tecnología. El enfoque interdisciplinario y colaborativo es esencial para impulsar la investigación y la toma de decisiones en un mundo cada vez más digitalizado.

En resumen, este TFG se erige como un pilar esencial en la construcción de un sistema que dé soporte tanto al personal docente e investigador como al estudiantado de la Universidad

de Oviedo, orientado a crear un futuro cada vez más inteligente y sostenible para la Universidad de Oviedo.

2. Motivación

Vivimos en una época donde la tecnología se ha vuelto una herramienta esencial para mejorar nuestra vida cotidiana y resolver complejos problemas. La digitalización y la conectividad son dos pilares que han demostrado tener un gran potencial para impulsar la eficiencia y la innovación en diferentes campos, especialmente en el contexto académico y de investigación. En este sentido, el Campus de Gijón de la Universidad de Oviedo presenta una oportunidad única para convertirse en un modelo referente en cuanto a la implementación y uso de tecnologías emergentes.

Observando las tendencias actuales, es evidente que las redes LoRa y los sensores IoT están allanando el camino hacia un mundo más conectado, eficiente y sostenible. Por ello, el despliegue de una red LoRa multi-nodo en el campus no sólo proporcionará una infraestructura robusta y escalable, sino que también permitirá la recolección y el análisis de datos relevantes de diferentes áreas del campus en tiempo real.

Un simple ejemplo de la utilización: se tiene una serie de dispositivos con la capacidad de monitorizar parámetros de clima a través de sensores IoT, posteriormente los datos se analizan en una plataforma privada de acceso online. Esto le permitirá la Universidad de Oviedo no sólo mejorar el confort y la calidad del ambiente para sus estudiantes y personal, sino también tomar decisiones basadas en datos para optimizar recursos y colaborar en investigaciones multidisciplinarias con otros centros educativos. Del mismo modo, se pueden implementar una amplia variedad de dispositivos de gran utilidad para la Universidad.

El proceso meticuloso de planificación, dimensionamiento, despliegue y validación asegura que este proyecto se desarrollará de manera rigurosa, cumpliendo con los estándares más altos del campo de la Ingeniería. Se ha puesto especial atención en la

integración con plataformas de monitorización y análisis de datos, garantizando así que los datos recolectados se utilicen de la manera más eficiente y beneficiosa posible.

Este proyecto se alinea fuertemente con los esfuerzos globales para promover un futuro más sostenible apoyando la realización de algunos objetivos establecidos por las Naciones Unidas: *ODS* (Objetivos de Desarrollo Sostenible). A través de la implementación de tecnologías avanzadas como LoRa y sistemas IoT, este proyecto acerca la Universidad hacia el alcance de dos objetivos clave: la "Educación de Calidad" (ODS 4) y "Ciudades y Comunidades Sostenibles" (ODS 11) [1].

3. Objetivos y alcance

En el contexto del Campus de Gijón de la Universidad de Oviedo, el trabajo se enfoca en la implementación y puesta en marcha de una red LoRa multi-nodo. Este despliegue se propone como un componente fundamental para la recopilación automatizada de datos provenientes de diversos sensores IoT distribuidos en varias áreas del campus. El objetivo principal de este proyecto es establecer una infraestructura sólida que dé soporte a la monitorización y análisis eficiente de los datos provenientes de los sensores tanto interiores como exteriores existentes, contribuyendo así a la mejora gestión y toma de decisiones en el entorno universitario.

Para alcanzar este objetivo principal, el trabajo se desarrollará en base a una serie de tareas específicas.

Objetivo 1: Planificación del despliegue de la Red LoRa

- *Scouting* del campus y otros puntos de interés para determinar ubicaciones estratégicas de *gateways* tanto en exteriores como en áreas interiores.
- Garantizar el acceso a Internet y la alimentación eléctrica necesarios para los nodos de red.
- Obtener los permisos requeridos para el despliegue de la red LoRa.
- Documentar la arquitectura de la red.

Objetivo 2: Despliegue de Nodos de Red

- Implementar el despliegue de los nodos de red en las ubicaciones previamente planificadas siguiendo la configuración de los dispositivos que se facilita en el Anexo 1.

Objetivo 3: Validación de funcionamiento de la red

- Diseño e implementación del dispositivo para la realización de medidas de cobertura.
- Realización de medidas de cobertura en el área del campus y otras localizaciones.
- Verificación del funcionamiento operacional de la red mediante el despliegue de dispositivos finales que hagan uso de la misma.

En conclusión, este Trabajo de Fin de Grado supone un pilar fundamental en la construcción de un porvenir más innovador y sostenible para la Universidad de Oviedo, al emprender la instalación de una red LoRa y la creación de una infraestructura tecnológica IoT que permitirá la captura y el análisis automatizado de datos en el campus y su utilización tanto en la gestión eficiente de los espacios, tareas de investigación o soporte docente.

4. Marco teórico

4.1. Internet of Things (IoT)

El avance tecnológico está ofreciendo una nueva manera de entender el mundo a través de un enfoque basado en datos, brindando mayores niveles de control y supervisión en sectores industriales y educativos. El crecimiento del IoT avanza a un ritmo más acelerado de lo que muchas compañías de telecomunicaciones anticiparon, continuando su expansión a pesar de los desafíos.

La interconexión de objetos cotidianos con las tecnologías de la comunicación es una realidad cada vez más consolidada. El IoT ha dado lugar a la generación masiva de datos por lo que el valor que se le da a la información se ha incrementado notablemente en los últimos años. Cada objeto conectado a IoT tiene su doble digital en la nube que produce un flujo prácticamente ininterrumpido de actualizaciones de la información como lecturas de sensores y operaciones de estados. Esta tecnología no sólo simplifica el proceso de la toma de decisiones, sino que también es crucial para el desarrollo en temas como las ciudades inteligentes, la gestión eficiente de recursos y la optimización de procesos industriales [2].

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, el Internet de las Cosas se ha convertido en la tecnología más adoptada por las empresas durante el primer trimestre del 2020, con un 16,8% de las compañías españolas incorporándola, superando a otras tecnologías como el Big Data, la impresión 3D y la robótica industrial [3]. A nivel mundial, se están conectando 127 nuevos dispositivos IoT [4] cada segundo, y se prevé que para el año 2025, la cifra de dispositivos conectados alcance los 150.000 millones [5]. A pesar de este crecimiento exponencial, aún falta establecer un estándar uniforme para las conexiones de estos dispositivos.

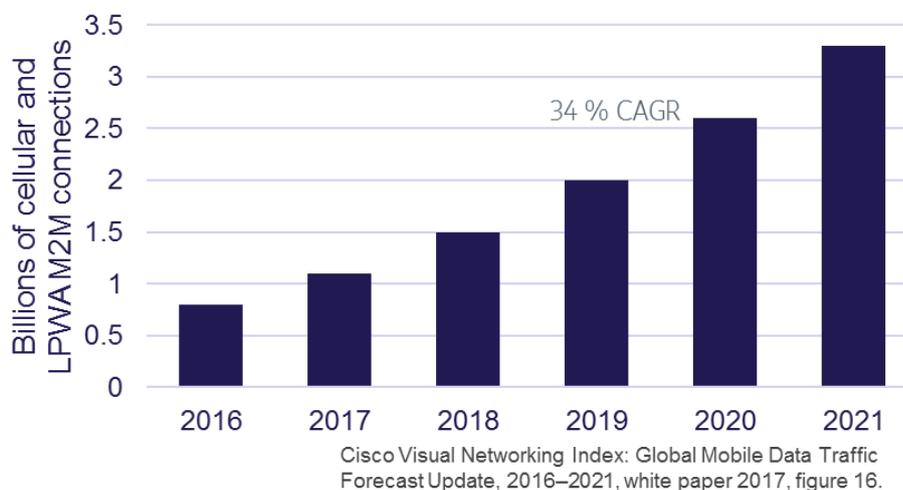


Ilustración 1 Representación de los dispositivos conectados a Internet en los últimos años

Los estándares globales de comunicación y protocolos actuales fueron creados con objetivos diferentes, enfocándose en la velocidad de transmisión o el manejo de grandes volúmenes de datos, sin considerar aspectos como la memoria, capacidad de procesamiento, consumo de energía y otras especificaciones relevantes para dispositivos de menor tamaño. Esta situación ha generado desafíos dentro de la industria y, al mismo tiempo, ha motivado a numerosas empresas a ver en el Internet de las Cosas una posibilidad para impulsar sus negocios. Como resultado, se ha desarrollado una amplia gama de tecnologías y protocolos de comunicación dirigidos a cumplir con los requisitos específicos de los dispositivos IoT, creando una competencia por establecerse en el mercado. Todavía es incierto hacia dónde se inclinará la balanza, y existe la posibilidad de que se fragmenten los estándares según el uso específico de cada dispositivo IoT.

Es evidente que, en el futuro cercano, se establecerán tanto las tecnologías como los protocolos de comunicación que dictarán los estándares para dispositivos de este tipo. Por ende, este estudio se enfocará en aquellos que actualmente poseen una mayor difusión y que ofrecen significativas ventajas para el sistema en cuestión, con el potencial de transformarse en verdaderas redes globales de información.

4.2. Tecnología LPWAN

Low-Power Wide-Area Network (LPWAN) es más bien un concepto que una tecnología en sí. Se podría definir como toda aquella red inalámbrica que utiliza un protocolo de transmisión de información capaz de enviar paquetes de datos pequeños a largas distancias, operando dentro de un espectro de banda estrecha. Está ideado para dispositivos que buscan optimizar el consumo de energía de su batería para alargar por varios años su vida útil.

Las redes LPWAN pueden ser de propiedad privada o administradas por terceros, y buscan satisfacer una demanda clave para dispositivos IoT, equilibrando los elementos cruciales de la comunicación inalámbrica: tasa de bits, alcance y eficiencia energética. Hasta la fecha, no existe una tecnología inalámbrica que logre optimizar estos tres aspectos simultáneamente, lo que obliga a comprometer uno de los aspectos. No obstante, LPWAN destaca por su capacidad para ajustarse a las exigencias de dispositivos IoT ofreciendo transmisión de paquetes pequeños, un amplio alcance y un bajo consumo energético [6].

4.3. LoRa (Long Range)

Esta red se basa en la tecnología de modulación de radio para facilitar la comunicación entre dispositivos LoRa dentro de la banda *ISM* (Industrial Scientific and Medical) [7], la cual está sujeta a normativas que definen y restringen el ciclo de trabajo, *duty cycle*. Dichas normativas aseguran un uso justo de la banda y evitan la congestión del espectro.

El *duty cycle* es un concepto fundamental en LoRaWAN, ya que define el tiempo máximo durante el que un dispositivo transmite en relación con el tiempo total de actividad, condicionando así la tasa de transmisión de paquetes. Por ejemplo, con un *duty cycle* del 1%, si se considera un periodo total de 1000 ms, el dispositivo podría transmitir durante 10 ms. Este límite ayuda a prevenir la sobrecarga de la red y garantiza el *fair access*, permitiendo que todos los dispositivos tengan una oportunidad justa de transmitir sus datos.

La Ilustración 2 muestra la aplicación práctica del *duty cycle* y cómo las configuraciones específicas de la red, la tasa de transmisión de datos y el *spreading factor* (SF) determinan el tiempo de emisión y el volumen de mensajes que se pueden enviar, remarcando así la importancia de planificar la red de acuerdo con las regulaciones establecidas.

	DR6 [Ⓢ]	DR5	DR4	DR3	DR2	DR1 [Ⓢ]	DR0 [Ⓢ]
<i>data rate</i>	SF7 ^{BW} ₂₅₀	SF7 ^{BW} ₁₂₅	SF8 ^{BW} ₁₂₅	SF9 ^{BW} ₁₂₅	SF10 ^{BW} ₁₂₅	SF11 ^{BW} ₁₂₅	SF12 ^{BW} ₁₂₅
<i>airtime</i>	30.8 _{ms}	61.7 _{ms}	113.2 _{ms}	205.8 _{ms}	411.6 _{ms}	823.3 _{ms}	1,482.8 _{ms}
<i>1% max duty cycle</i>	3.1 _{sec} 1,167 _{msg/hour}	6.2 _{sec} 583 _{msg/hour}	11.3 _{sec} 318 _{msg/hour}	20.6 _{sec} 174 _{msg/hour}	41.2 _{sec} 87 _{msg/hour}	82.3 _{sec} 43 _{msg/hour}	148.3 _{sec} 24 _{msg/hour}
<i>fair access policy</i>	88.8 _{sec (avg)} 40.5 _{avg} 972 _{msg/24h}	177.7 _{sec (avg)} 20.3 _{avg} 486 _{msg/24h}	325.9 _{sec (avg)} 11.0 _{avg} 265 _{msg/24h}	592.8 _{sec (avg)} 6.1 _{avg} 145 _{msg/24h}	1,185.5 _{sec (avg)} 3.0 _{avg} 72 _{msg/24h}	2,371.1 _{sec (avg)} 1.5 _{avg} 36 _{msg/24h}	4,270.3 _{sec (avg)} 0.8 _{avg} 20 _{msg/24h}

Ilustración 2 Calculadora *Airtime*, relación SF - *data rate* - *duty cycle* para la banda EU868-870 MHz

La estructura de esta red está formada por diversos dispositivos de radio LoRa y generalmente funciona en las frecuencias de 433MHz, 868MHz (frecuencia operativa en Europa) o 915MHz, variando según la región geográfica. Utiliza técnicas de espectro ensanchado para la transmisión de datos, empleando bandas de frecuencia más amplias de lo estrictamente necesario para el envío de información. Esto permite la recepción simultánea de varias señales a diferentes velocidades. Los enlaces LoRa pueden alcanzar distancias de hasta 20 km en áreas abiertas, con visión directa, aunque se considera que el rango típico de comunicación en entornos urbanos es de aproximadamente 2-3 km, con una velocidad de transferencia de datos que puede llegar a 50 Kbps. Esta tecnología es especialmente valorada por su bajo consumo energético, lo que la hace ideal para su uso con sensores que transmiten pocos datos de manera intermitente y que funcionan con baterías.

Los dispositivos LoRa emplean un protocolo de red asíncrono denominado LoRaWAN. Posee dos capas de seguridad, una clave de sesión de red única compartida entre el dispositivo y el servidor de red y una clave de sesión de aplicación única compartida de un extremo a otro del en el nivel de aplicación. Es importante diferenciar entre LoRa, que especifica la tecnología de la capa física y las modulaciones posible, y LoRaWAN, que proporciona las funcionalidades y automatismos de la red.

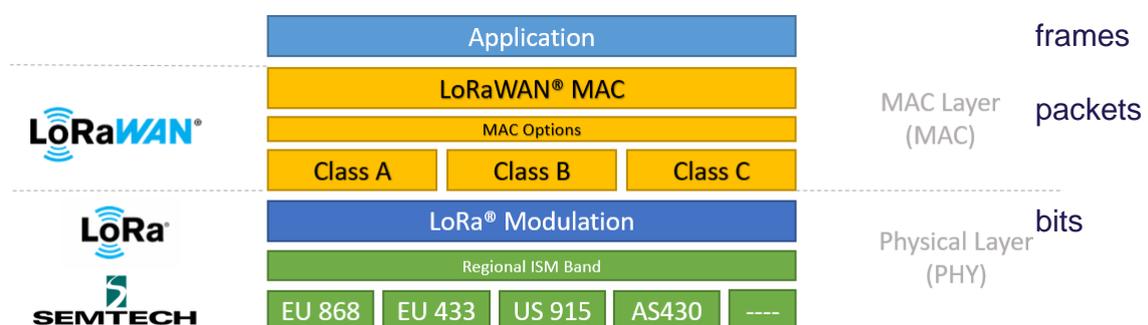


Ilustración 3 LoRa vs LoRaWAN

La tecnología LoRa se encarga de la modulación RF para las redes de largo alcance y bajo consumo energético, mientras que LoRaWAN es el protocolo de red que utiliza LoRa en la capa física, aportando funcionalidades de red, comunicación bidireccional segura, movilidad y localización. Asimismo, LoRaWAN se ocupa de la gestión de la red y la configuración de los parámetros de radio. En LoRaWAN, la comunicación entre los dispositivos finales y *gateways* no es directa; los mensajes son recibidos por todos los nodos cercanos y la deduplicación se realiza a nivel del servidor de red [8].

4.4. Radiopropagación

Entender la radiopropagación en LoRa es fundamental para una implementación efectiva de dispositivos IoT en la red; asimismo, la transmisión de datos de manera fiable debe ser una de las consideraciones elementales en el diseño. Por lo tanto, los conceptos RSSI y SNR son esenciales para el análisis y la mejora de la calidad de la señal en la red LoRaWAN.

El RSSI (Indicador de Fuerza de la Señal Recibida) es una medida de la potencia que se recibe en un receptor y se emplea para estimar la calidad de la conexión inalámbrica y la distancia aproximada al transmisor [9][10]. Para el caso estudiado, el receptor es el nodo, *gateway*, y el transmisor, el dispositivo final o sensor. Un valor RSSI alto, por ejemplo, por encima de -100 dBm, sugiere una señal más fuerte y, por lo tanto, una conexión más confiable.

Por otro lado, el SNR, o Relación Señal – Ruido, compara la señal útil frente al ruido de fondo. Un SNR alto indica una señal clara, sin interferencias significativas, mientras que un SNR bajo insinúa una señal pobre en la que predomina el ruido, lo cual se podría traducir en pérdida de la información en los datos transmitidos. La tecnología LoRa es capaz de trabajar con parámetros SNR negativos, hasta aproximadamente -20 dB, lo que permite la recepción de señales en condiciones de ruido muy elevado, aunque esto podría afectar al rendimiento del dispositivo [11]. Esta capacidad es una característica única de LoRa, lo que permite su operación en entornos de alta interferencia y atenuación de la señal útil.

La propagación de señales radioeléctricas puede variar debido a las propiedades físicas del entorno por el que viajan, fenómeno conocido como desvanecimientos. Este efecto puede reducir la potencia de la señal recibida y, por tanto, alterar los valores de RSSI y SNR. Los

desvanecimientos pueden ser temporales y fluctuar dependiendo de factores ambientales, obstáculos físicos y su material o la movilidad de los dispositivos dentro de la red [12].

Para garantizar una comunicación eficaz en una red, es imprescindible monitorizar y ajustar estos parámetros de radiopropagación con el fin de optimizar la configuración de la red, proporcionando así un servicio más robusto y fiable.

5. Desarrollo

A lo largo de la siguiente sección se describirá en detalle todo el proceso de la implementación de red que se ha llevado a cabo: el estudio de las posibles localizaciones, la arquitectura de red y el despliegue final de los nodos.

5.1. Scouting de las posibles localizaciones de despliegue

Con el objetivo de ejecutar un despliegue óptimo de los nodos de red, *gateways*, se realiza un estudio sobre el terreno que consiste en encontrar las cuatro ubicaciones (exteriores e interiores).

Los *gateways* (nodos) han de estar posicionados estratégicamente. Es esencial que estos dispositivos se comuniquen de una manera fluida con los dispositivos o sensores, minimizando los obstáculos que pueda haber entre ellos. Es por ello por lo que se ha realizado una investigación exhaustiva de las mejores ubicaciones para la situación tanto de los *gateways* como de los dispositivos finales.

La finalidad es encontrar las ubicaciones óptimas para garantizar una cobertura homogénea en todo el campus y el Ed. Polivalente. En consecuencia, siguiendo las sugerencias del apartado “Ubicación del *Gateway*” del Anexo 1, se determinó que las posibles localizaciones para la instalación de los nodos son las siguientes:

- Cátedra 5G, Ed. Polivalente, capaz de proveer cobertura completa a la planta principal e incluso la planta baja del mismo.
- Cátedra MediaLab, Ed. Polivalente. Dispone de un *gateway* que proporciona una amplia cobertura. Su ubicación estratégica junto a una ventana facilita la comunicación tanto para las plantas superiores del edificio como para las áreas exteriores.
- La azotea de la Escuela de Marina para la instalación de un nodo *outdoor*.
- La terraza del Módulo 3 del Ed. Departamental Oeste, por ser el punto más central para cubrir eficazmente toda el área del campus.

Es cierto que las ubicaciones de los *gateways* determinan el alcance y la eficacia de la cobertura, pero igualmente se han de considerar otros factores a la hora del despliegue:

- Acceso a red eléctrica para alimentar el dispositivo.
- Acceso a red: *Ethernet* o *Wi-Fi*.
- Se puede considerar la posibilidad de emplear PoE que cumple con las dos características anteriores.
- Facilidad de montar la antena LoRa.
- Amplia visibilidad y menor número de obstáculos.

Por otra parte, en Julio del 2023, surgió la posibilidad de instalar un nodo en el Centro de Formación Profesional Revillagigedo. Esta iniciativa representó una gran oportunidad para ofrecer cobertura para la zona del puerto de Gijón, Cimadevilla, la playa de Poniente, entre otros. Un despliegue en dicha localización resultó en beneficios no solo para el profesorado y los estudiantes del centro FP, sino también para todas las empresas colindantes.

5.1.1. Resumen de las posibles localizaciones

Ubicación <i>Gateway</i>	Tipo	Características relevantes
Ed. Polivalente, Cátedra Thin5G, 1ª Planta	<i>Indoor</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ubicación muy centralizada para dar cobertura a las plantas bajas del edificio
Ed. Polivalente, MediaLab, 3ª Planta	<i>Indoor</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Gateway</i> instalado en el 2021
Dpto. Oeste, Módulo 3, Azotea	<i>Outdoor</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ubicación exterior inmejorable por su centralidad • Largo alcance
Escuela de Marina, Azotea	<i>Outdoor</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Buena ubicación exterior • Largo alcance
Centro FP Revillagigedo, Azotea	<i>Outdoor</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ubicación exterior excelente • Abarca zona portuaria, playa de Poniente y el centro de Gijón

Tabla 1 Ubicaciones consideradas para el despliegue

5.2. Arquitectura de red

En cuanto a la arquitectura de red LoRaWAN, los dispositivos finales (sensores) establecen comunicación con *gateways*, que actúan como puentes hacia Internet o redes privadas. Los nodos retransmiten la información recopilada a un servidor de red o *backend*. Esta orientación permite una futura implementación por parte de docentes y alumnos de la Universidad de Oviedo en BalenaCloud, optimizando la gestión de los datos.

BalenaCloud, una plataforma IoT, simplifica la implementación y administración de *backends* personalizados. Asimismo, adapta la infraestructura de red a los requerimientos específicos para cada aplicación desarrollada. La centralidad de BalenaCloud facilita el control unificado de dispositivos y datos, mientras que su escalabilidad asegura que la infraestructura pueda expandirse eficientemente para soportar el crecimiento del total de dispositivos y volumen de datos, manteniendo un alto rendimiento.

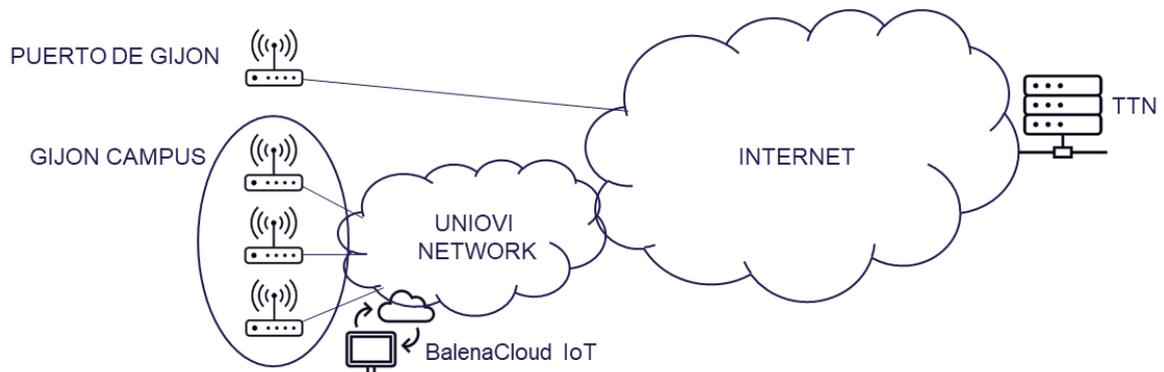


Ilustración 4 Arquitectura de red implementada en el campus de Gijón

La Ilustración 4 muestra la arquitectura de red en el campus de Gijón y alrededores, partiendo del enlace de los cuatro *gateways* con los dispositivos finales. Los nodos envían los datos inicialmente a TTN y, desde ahí, se redirigen hacia BalenaCloud IoT. Para aclarar mejor este proceso, la Ilustración 5 describe la trayectoria de estos datos, desde su recopilación por los sensores hasta su procesamiento en el *backend*.

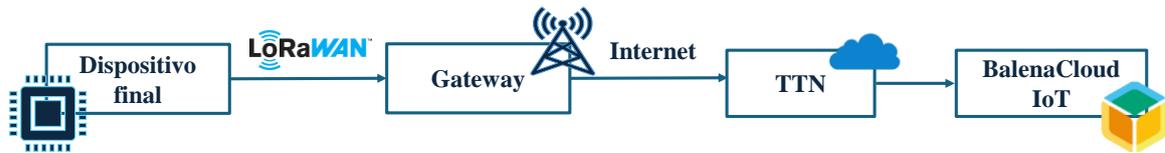


Ilustración 5 Trayectoria del flujo de datos, desde el sensor hasta el *backend*

Es esencial destacar que TTN constituye una red global y abierta para los dispositivos IoT que operan mediante la tecnología LoRaWAN, permitiendo así la transmisión de datos de acuerdo con las normativas establecidas. En el contexto del proyecto, la gestión de los dispositivos se realiza a través de TTN. BalenaCloud actúa como un gestor de datos en tiempo real para los sensores y aplicaciones sin involucrarse directamente en su administración [13].

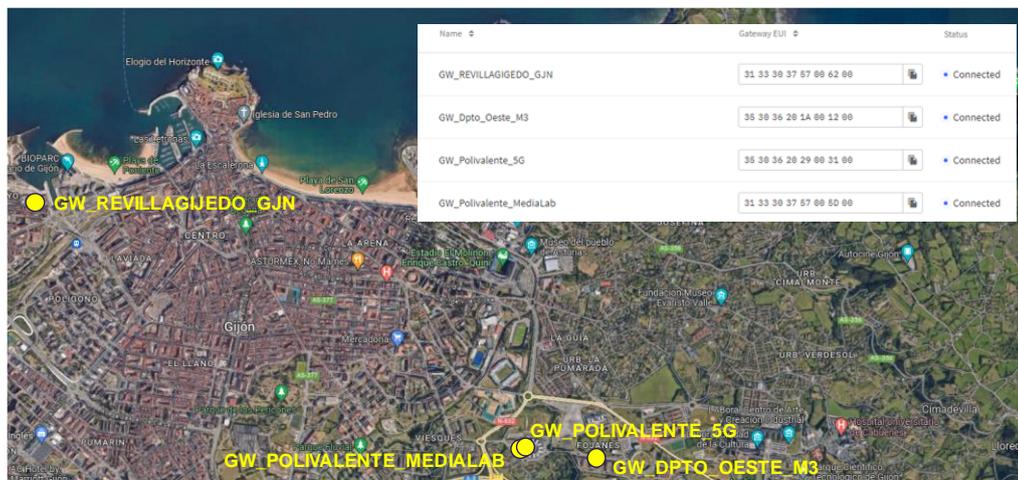


Ilustración 6 Ubicaciones de los *gateways* de la red, registro en TTN

5.3. Despliegue final

Una vez determinadas todas las ubicaciones, se piden los permisos pertinentes a la Universidad de Oviedo, además de colaborar con el Centro de Revillagigedo, Vicerrectorado de Infraestructuras y el personal encargado del mantenimiento y redes del Campus de Gijón.

De esta manera, la distribución de los nodos exteriores e interiores queda de la siguiente manera:

- Nodos *outdoor*
 - Terraza Módulo 3, Dpto. Oeste, Campus de Gijón
 - Terraza del Centro de FP Revillagigedo, Gijón

- Nodos *indoor*
 - Cátedra Thin5G, Ed. Polivalente, Planta 1, Campus de Gijón
 - Cátedra MediaLab, Ed. Polivalente, Planta 3, Campus de Gijón

Para cada uno de los nodos involucrados, se realizó un proceso meticuloso de configuración dentro del propio *software* del dispositivo y de la plataforma *backend* TTN. Este proceso se encuentra ampliamente documentado en el “Manual de Configuración del *Gateway*”, en el Anexo 1. Dicho manual ofrece una guía paso a paso, abarcando desde los procedimientos de preconfiguración iniciales hasta los aspectos que tener en cuenta para una eficiente instalación del dispositivo.



Ilustración 7 Fotografía aérea (Google Maps) con las ubicaciones de los gateways en la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón



Ilustración 8 Fotografía aérea (Google Maps) con la ubicación del gateway en el Centro de Formación Profesional Revillagigedo

5.3.1. Despliegue Outdoor

El despliegue de los *gateways* exteriores se realizará en la terraza de la Fundación Revillagigedo y en la terraza del Módulo 3.

5.3.1.1. Despliegue Revillagigedo

En Julio de 2023, se realiza el despliegue del *gateway* en el centro FP de Revillagigedo sin ningún inconveniente. El personal técnico del centro facilitó el cable PoE con salida a Internet de aproximadamente 20 m de longitud. La instalación duró alrededor de hora y el nodo ha estado activo desde entonces.



Ilustración 9 Despliegue del Gateway en el Centro FP Revillagigedo

Para desplegar el *gateway*, se siguen las instrucciones que se detallan en el Anexo 1, “Manual de Instalación. Gateway Mikrotik”, se configuran tanto los parámetros básicos como el servidor de Red LoRa (LNS).

- IP estática y puerto de enlace proporcionados por el centro.
- Se establece una contraseña
- LNS:
 - Nombre: ttn-internal
 - Dirección: eu1.cloud.thethings.network
 - Up port: 1700
 - Down port: 1700

Una vez realizada esta configuración, el *gateway* se registra en el servidor de red, TTN, ingresando la información proporcionada por el fabricante (ID, EUI) y la frecuencia apropiada (para Europa, 863-870 MHz).

- ID del gateway: eui-3133303757006200
- Frecuencia del plan: EU_863_870_TTN
- EUI del Gateway: 3133303757006200

5.3.1.2. Despliegue Dpto. Oeste

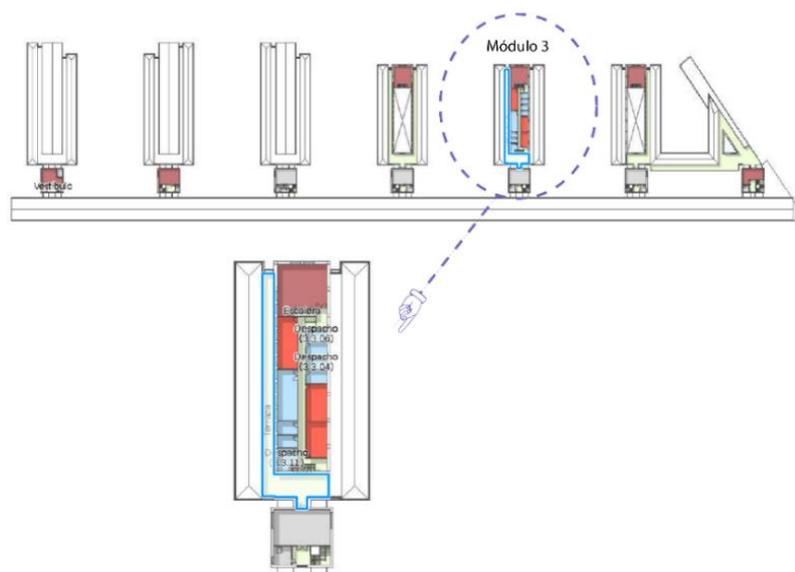


Ilustración 10 Plano Ed. Dpto. Oeste (arriba). Ubicación del gateway exterior, Terraza Módulo 3

Durante la instalación del *gateway* de la azotea se presentaron ciertos desafíos técnicos. Los puertos del switch proporcionaban un voltaje de 44 V, no compatibles con los 30 V máximos del PoE pasivo soportados por el nodo, lo que imposibilitaba su correcto funcionamiento al conectarlo directamente. Se solicitó al personal de Redes que extendiera el cable de red hasta la terraza. Posteriormente, se implementó un *splitter* PoE para ajustar el voltaje proporcionado por el *switch* con el requerido por el *gateway* y se añadió una caja estanca para proteger este *hardware*.

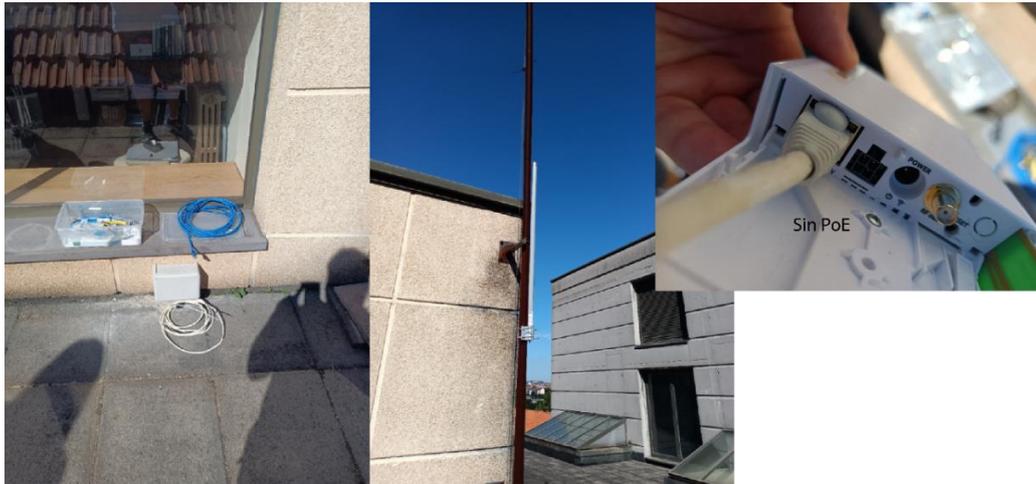


Ilustración 11 Instalación fallida en la terraza del Módulo 3.

Desafortunadamente, la semana siguiente, las condiciones meteorológicas adversas combinadas con la infraestructura obsoleta de los switches provocaron un pico de sobretensión en la red que acabaron por dañar el *splitter*.



Ilustración 13 Daños en el cable *Ethernet*



Ilustración 12 Daños en el inyector PoE

Finalmente, se decidió sustituir el *splitter* y el cable *Ethernet* dañados. Después de estas modificaciones, la instalación no necesitó cambios adicionales y el nodo quedó operativo desde noviembre de 2023.

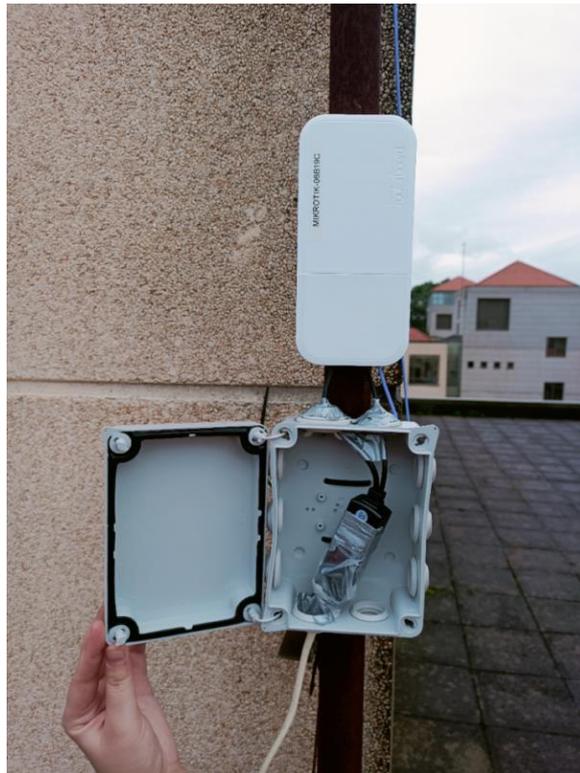


Ilustración 14 Instalación definitiva del *gateway outdoor* en el Dpto. Oeste, Módulo 3 (1)



Ilustración 15 Instalación definitiva del *gateway outdoor* en el Dpto. Oeste, Módulo 3 (2)

Al igual que en el despliegue de Revillagigedo, se configura el dispositivo tanto desde la interfaz del fabricante como desde el servidor de red, introduciendo la siguiente información:

- Conectado al punto de acceso Wi-Fi, en la interfaz de Mikrotik:
 - IP estática: 156.35.155.10
 - Puerta de enlace: 156.35.155.205
 - Establecer contraseña
 - Configuración de LoRa, LNS:
 - Nombre: ttn-internal
 - Dirección: eu1.cloud.thethings.network
 - Up port: 1700
 - Down port: 1700
- Desde TTN:
 - ID del *gateway*: gw-dpto-oeste-m3
 - Frecuencia del plan: EU_863_870_TTN
 - EUI del *Gateway*: 353036201A001200

5.3.2. Despliegue Indoor

El despliegue de los *gateways* interiores se desarrollaron en el Ed. Polivalente.

5.3.2.1. Despliegue Laboratorio 5G

En septiembre de 2023, se instaló un *gateway* en el Laboratorio 5G, situado en la primera planta del Ed. Polivalente. Gracias a esta estratégica ubicación, el nodo asegura una cobertura homogénea dentro del edificio. La instalación se realizó sin inconvenientes, aprovechando que el laboratorio ya contaba con la infraestructura necesaria, PoE y acceso directo a internet a través del *switch* principal del laboratorio.

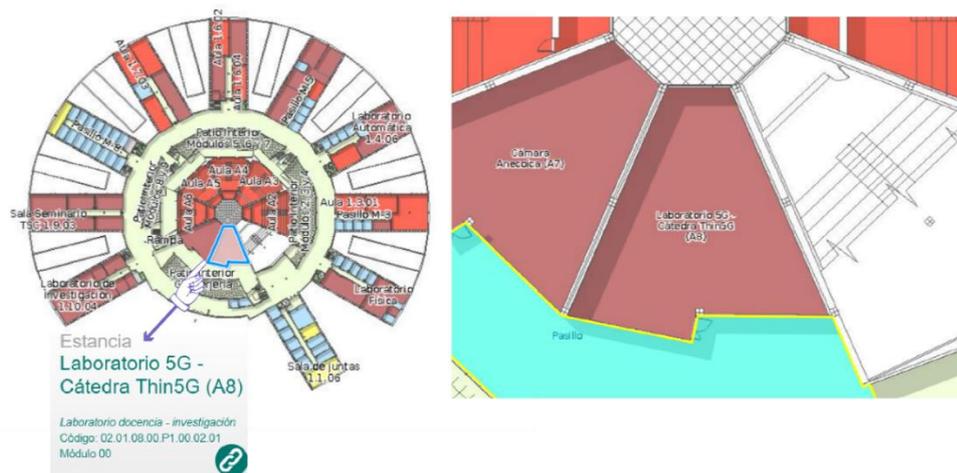


Ilustración 16 Plano Ed. Polivalente (a la izquierda). Ubicación del gateway interior, Cátedra Thin5G

Al igual que en los despliegues anteriores, se configura el dispositivo tanto desde la interfaz del fabricante como desde el servidor de red, siguiendo las instrucciones del Manual del Anexo 1:

- Conectado al punto de acceso Wi-Fi, en la interfaz de Mikrotik:
 - IP estática: 156.35.117.16
 - Puerta de enlace: 156.35.117.205
 - Establecer contraseña
 - Configuración de LoRa, LNS:

- Nombre: ttn-internal
 - Dirección: eu1.cloud.thethings.network
 - Up port: 1700
 - Down port: 1700
-
- Desde TTN:
 - ID del *gateway*: eui-3530362029003100
 - Frecuencia del plan: EU_863_870_TTN
 - EUI del *Gateway*: 3530362029003100



Ilustración 17 Instalación del *gateway indoor*, Laboratorio 5G

5.3.2.2. Nodo MediaLab

Ubicado en la Cátedra MediaLab en la tercera planta del Ed. Polivalente, ofrece una cobertura *indoor*. El *gateway* lleva totalmente operacional desde septiembre del 2021.

Gateway Indoor (MediaLab)



Ilustración 18 Ubicación del Gateway situado en el Laboratorio de MediaLab



Ilustración 19 Instalación del *gateway indoor*, MediaLab

Daria Bakteeva Díaz-Piñeiro– Febrero 2024

5.3.3. Resumen del despliegue

Ubicación del Gateway	Nombre del Gateway en TNN	Gateway ID en TTN	Fecha del <i>scouting</i>	Fecha de la instalación	Tiempo total de la instalación
Centro FP Revillagigedo, Azotea	GW_REVILLAGIGEDO_GJN	eui-3133303757006200	Julio 2023	Julio 2023	1 hora
Dpto. Oeste, Módulo 3, Azotea	GW_Dpto_Oeste_M3	gw-dpto-oeste-m3	Septiembre 2023	Noviembre 2023	3 horas
Ed. Polivalente, Cátedra Thin5G, 1ª Planta	GW_Polivalente_5G	eui-3530362029003100	Septiembre 2023	Septiembre 2023	1 hora
Ed. Polivalente, MediaLab, 3ª Planta	GW_Polivalente_MediaLab	gateway-medialab		Septiembre 2021	

Tabla 2 Resumen de gateways desplegados

6. Validación operativa de la red

Con el objetivo de validar la efectividad de la red desplegada, se llevan a cabo mediciones de cobertura en diferentes ubicaciones. Para ello se desarrollo un dispositivo que permita obtener los parámetros RSSI y SNR que determinan la calidad de la señal.

6.1. Diseño del dispositivo medidor de cobertura

Una parte fundamental del proyecto es la validación operacional del despliegue final de los nodos. Para ello, se desarrolla un dispositivo capaz de medir la cobertura en una ubicación específica.

Este dispositivo se compone de una placa de desarrollo LilyGo TTGO LoRa32 v2.6 que integra un chip con tecnología LoRa y un botón que autoriza el envío de datos dentro de la red LoRaWAN.

- Al presionar el botón, se envía un paquete de datos a través de la red. Este mensaje será captado por el *gateway* más cercano al dispositivo y lo reenviará a TTN.
- Después de enviar el mensaje, se abre una ventana de recepción, el dispositivo entra en modo escucha esperando un mensaje de vuelta por parte del servidor de red.
- Si en este tiempo el dispositivo recibe una respuesta, el mensaje que llega de vuelta proporciona información sobre la confirmación de recibo, ACK.
- Mediante el manejo de las librerías pertinentes, se muestran en pantalla los parámetros RSSI y SNR de la señal que llega de vuelta al dispositivo.

6.1.1. *Hardware del dispositivo*

El dispositivo se implementa en una placa de desarrollo LilyGo LoRa32 v2.6 que fusiona las altas prestaciones de un microcontrolador ESP32 con tecnología de comunicación LoRa, además de una pantalla OLED de 0.96 pulgadas integrada.

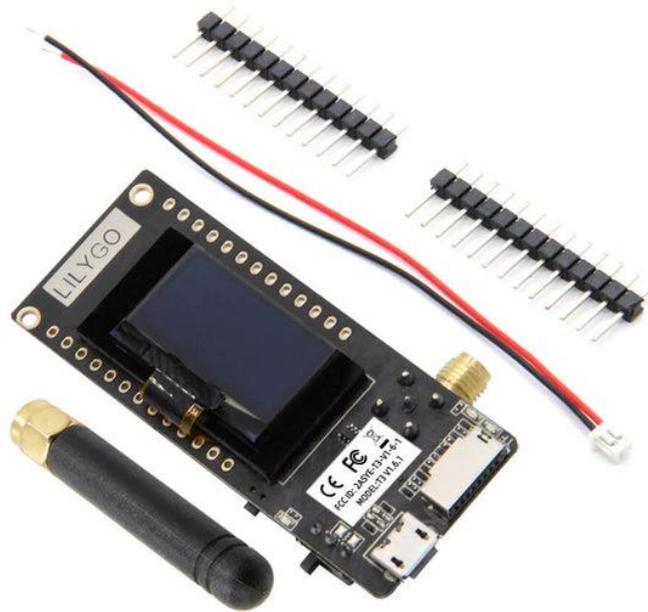


Ilustración 20 LilyGo LoRa32 v2.6

6.1.1.1. PCB

Para validar el despliegue de la red, se ha diseñado un prototipo capaz de medir la intensidad de la cobertura LoRa.

Esto incluye el diseño de una PCB que integre los componentes *hardware* necesarios: la placa de desarrollo y un botón encargado de inicializar la comunicación con el *gateway*

más cercano. Dicho botón se configura con la lógica *pull – down* y emplea una resistencia interna programable de la LilyGo.

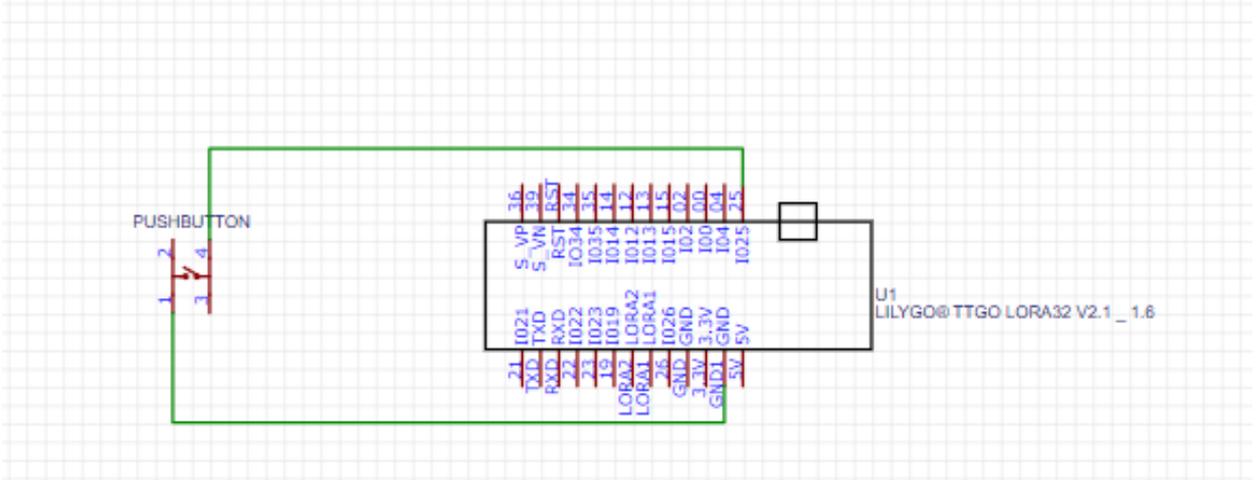


Ilustración 21 Esquemático



Ilustración 22 Diseño de la PCB, vista 3D

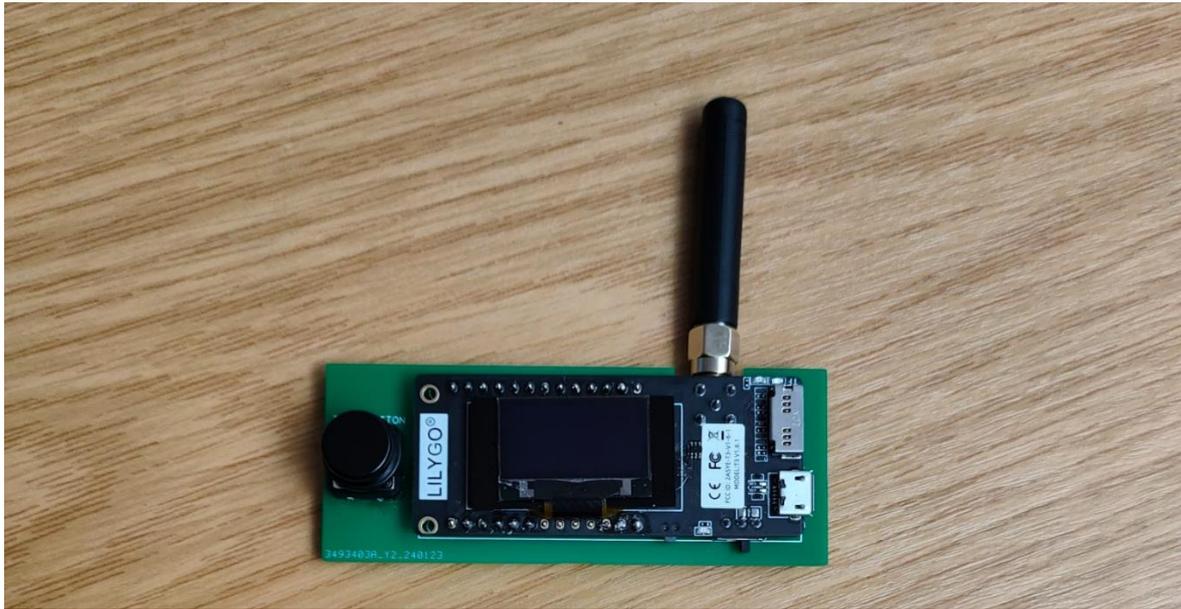


Ilustración 23 Dispositivo montado sobre la PCB

6.1.1.2. Diseño mecánico

Para complementar el diseño del prototipo y asegurar su durabilidad se diseña una carcasa prototipada en 3D. El diseño no sólo protege los componentes del dispositivo, sino que también facilita su manejo en diferentes ubicaciones.

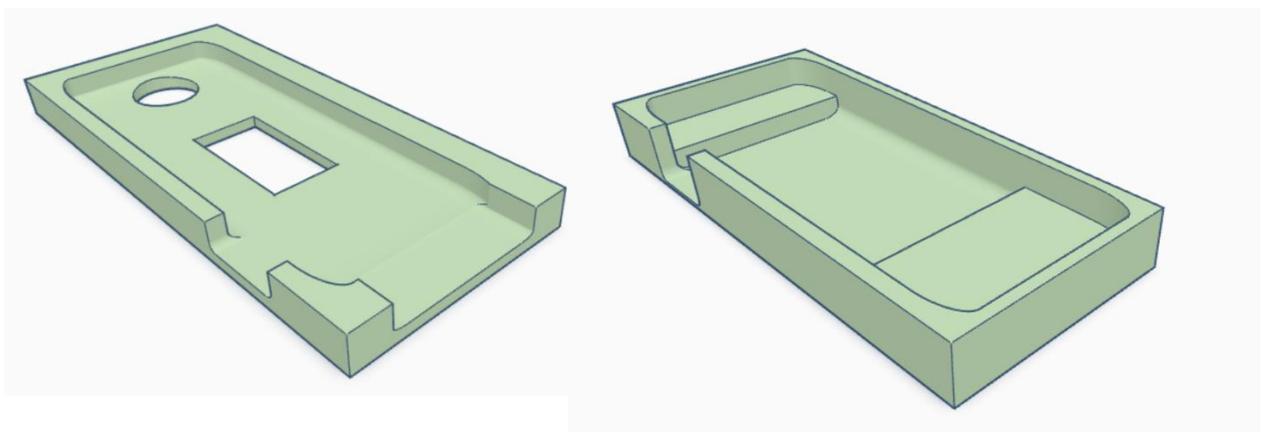


Ilustración 24 Diseño de la parte superior de la carcasa, 3D (a la izquierda) y parte inferior de la carcasa, 3D (a la derecha)

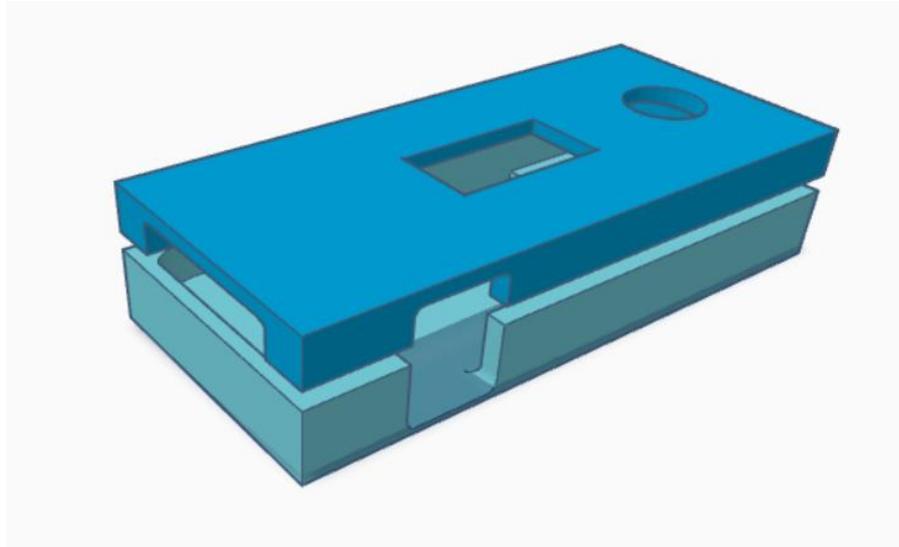


Ilustración 25 Diseño final, 3D

Para facilitar el acceso al dispositivo, se ha optado por unir las dos mitades de la carcasa mediante imanes situados en las cuatro esquinas. De esta manera, si se necesita resetear el dispositivo o realizar verificaciones técnicas, será tan sencillo como levantar la tapa.



Ilustración 26 Prototipo de carcasa impresa en 3D, las dos partes son vistas por dentro



Ilustración 27 Ensamblaje final del prototipo

6.1.2. Software del dispositivo

El código del programa se puede consultar en el Anexo 2 de la documentación.

El programa implementado adopta una arquitectura de programación basada en hilos (threads) para realizar múltiples tareas de manera eficiente. Mediante ejecución de diferentes bloques de código, conocidos como hilos, de manera independiente y simultánea, se mejora la capacidad de respuesta y multitarea del sistema.

Cada hilo se gestión por un controlador de hilos (*ThreadController*), que coordina tanto el tiempo de ejecución como la operación de cada hilo.

6.1.2.1. *ScreenThread*

Este hilo se encarga de mostrar una animación fluida en la pantalla del dispositivo. Dicha animación consiste en una pelota, la cual se refresca constantemente, salvo que el sistema esté ocupado detectando la presión del botón o mostrando información por pantalla.

6.1.2.2. *ButtonThread*

Este hilo escucha constantemente el estado del botón. En el momento en el que detecta una pulsación, cambia de estado para enviar un paquete de datos, lo cual inicia una comunicación que permite estimar los parámetros RSSI y SNR.

6.1.2.3. *RadioThread*

Este hilo maneja las comunicaciones LoRaWAN controlando el proceso de conexión a la red LoRa y la transmisión de datos, activándose únicamente cuando se detecte una pulsación del botón y cuando la radio esté lista para transmitir, evitando así colisiones y problemas de comunicación en la red.

La programación basada en hilos facilita la depuración del código y el gobierno independiente de cada parte del programa. Además, este enfoque resulta beneficioso para la gestión de la batería, lo cual es especialmente importante en dispositivos IoT que requieren una optimización del consumo energético.

6.1.2.4. Diagrama de flujo

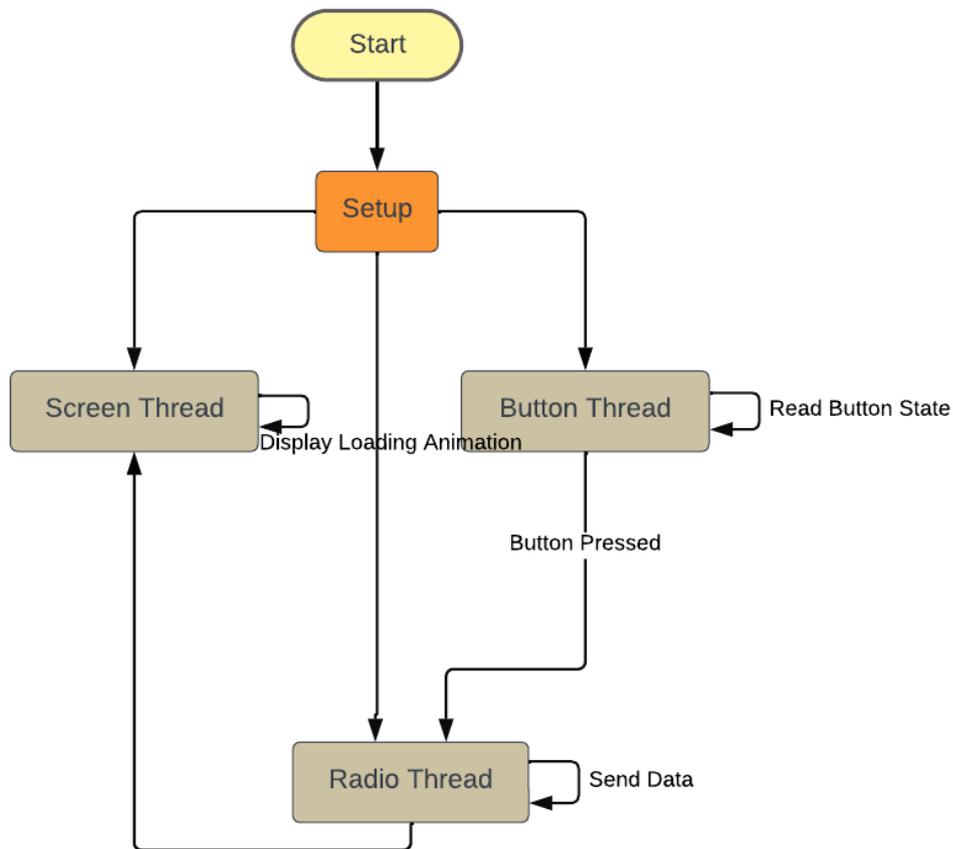


Ilustración 28 Diagrama de flujo del programa, implementación por hilos

6.2. Resultados: Mapas de calor

Tras recopilar las mediciones necesarias, se elaboraron mapas de calor para cada ubicación clave, mostrando los valores de RSSI y SNR en cada punto medido, lo que permite una visualización detallada de la calidad de la señal en las áreas evaluadas.

Generalmente, el RSSI muestra una distribución homogénea, incrementando su intensidad a medida que nos acercamos al *gateway*. Por otro lado, el SNR tiende a mantenerse constante en la mayoría de las ubicaciones, registrando valores menores a 0 dB sólo en puntos aislados debido a la mayor presencia de señales de interferencia y/o mayor cantidad de obstáculos físicos.

6.2.1. Mediciones *Outdoor*

6.2.1.1. Campus de Gijón

Al realizar mediciones en el exterior del campus, se observó un RSSI, Ilustración 29, ciertamente estable y robusto en toda el área siendo los valores máximos alrededor de -80 dBm en torno a la entrada del Ed. Polivalente y -85 dBm en el aparcamiento del Módulo 2-3 y Módulo 3-4. Este resultado es totalmente lógico, pues dichas ubicaciones exteriores son las más cercanas a los *gateways* situados en el Laboratorio 5G y la azotea del Módulo 3 de Dpto. Oeste, respectivamente.

Respecto al SNR, Ilustración 30, los valores de las mediciones se mantienen estables entre 3 dB y 9 dB, indicando una mejor relación señal – ruido cerca del *gateway* (valor medio de 7.5 dB) y una mayor caída en presencia de ruido e interferencias (valor medio de 3.75 dB).

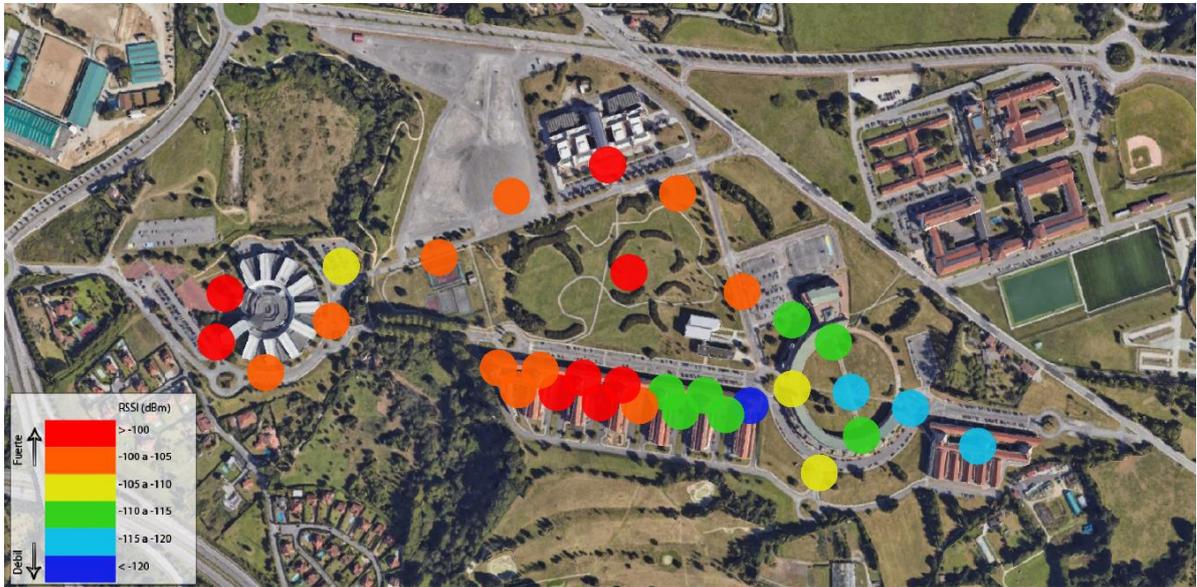


Ilustración 29 RSSI - Outdoor del Campus de Gijón



Ilustración 30 SNR - Outdoor del Campus de Gijón

6.2.1.2. Puerto de Gijón, puerto deportivo, playa de Poniente

En la zona de Revillagigedo y el puerto deportivo de Gijón, se registra un RSSI alto (Ilustración 31) dentro de un radio de 300 m alrededor del nodo exterior situado en el centro FP, con valores por encima de -90 dBm. La señal se atenúa de manera simétrica al alejarse del *gateway*, aunque proporciona intensidad de -120 dBm a 2 km, a pesar de la densidad urbana del área.

En cuanto al SNR (Ilustración 32), se observa una consistencia en los valores a lo largo de esta área, muy similares a los del campus, fluctuando entre 1 dB. y 7.5 dB.



Ilustración 31 RSSI Outdoor - zona Revillagigedo



Ilustración 32 SNR Outdoor - zona Revillagigedo

6.2.2. Mediciones *Indoor*

6.2.2.1. Edificio Polivalente, Planta 1

Las siguientes Ilustraciones 33 y 34 demuestran que la cobertura dentro del edificio Polivalente es excepcional, evidenciada por altos valores de RSSI y un SNR estable en toda la primera planta, lo que indica una señal fuerte y eficaz. Esto se atribuye a la ubicación central del *Gateway* del laboratorio 5G, que promueve una distribución equitativa de la señal, blindando así una cobertura inmejorable.

El máximo valor registrado de RSSI fue de -61 dBm, a la entrada del Laboratorio 5G con un SNR de 7.5 dB. El mínimo de -110 dBm, y por tanto la señal más débil, se observó en el pasillo entre el Módulo 5 y 6, además de un SNR de 6.75 dB. Indudablemente, estos valores indican una excelente cobertura en la planta principal del Edificio Polivalente.

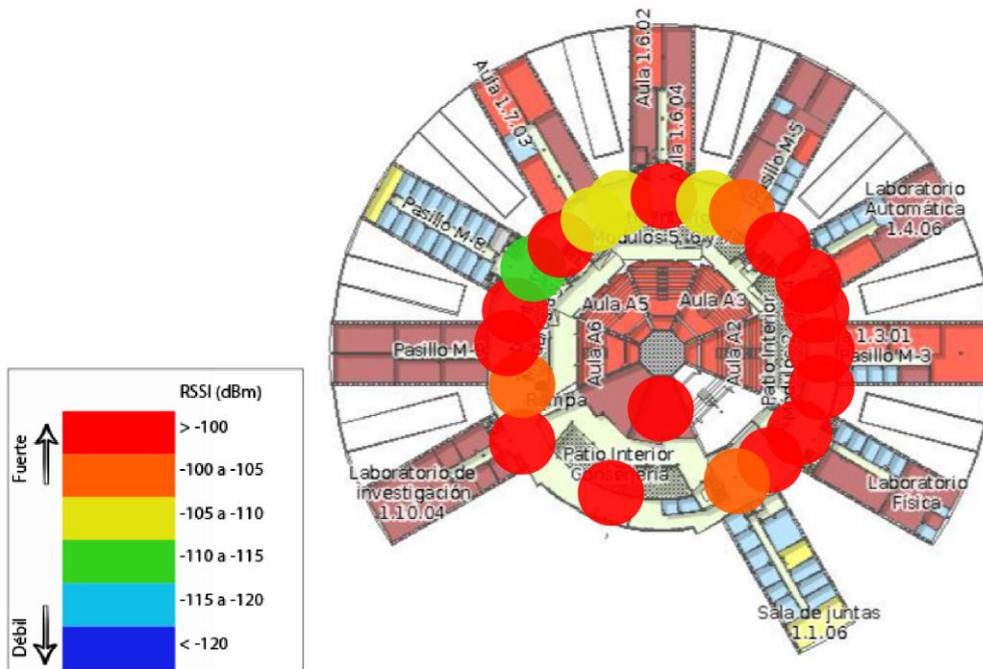


Ilustración 33 RSSI Indoor - Ed. Polivalente Planta 1

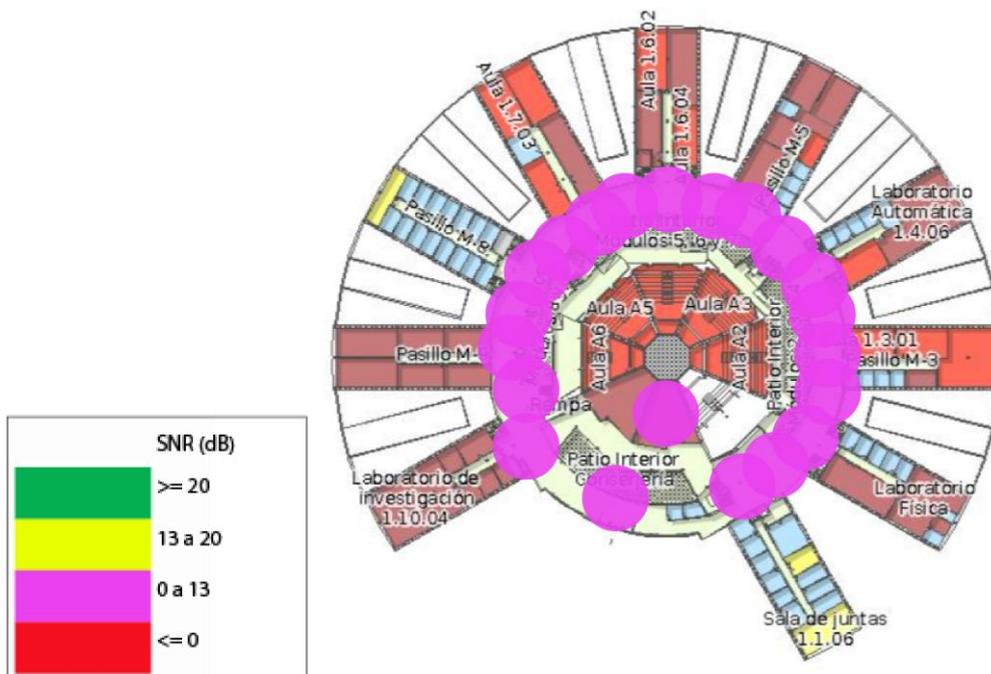


Ilustración 34 SNR Indoor - Ed. Polivalente Planta 1

6.2.2.2. Edificio Polivalente, Planta Baja

La cobertura en la planta baja del edificio Polivalente es generalmente robusta, aunque experimenta una atenuación RSSI (Ilustración 35) en los puntos más alejados del *gateway*; probablemente, debido a la presencia de obstáculos físicos que debilitan la señal. A pesar de esto, los valores de SNR (Ilustración 36) se mantienen en un rango estable y positivo, ligeramente inferiores a los de la primera planta.

Los valores de RSSI más altos, de media -95 dBm, fueron detectados en la zona antiguo comedor y las aulas de exámenes 1 y 2 y la media del valor de SNR medida fue de 6.5 dB.

En cambio, la peor señal de la planta baja ha sido registrada al final del pasillo, después del Módulo 8, con un valor para RSSI de -113 dBm y un SNR de 6.75 dB.

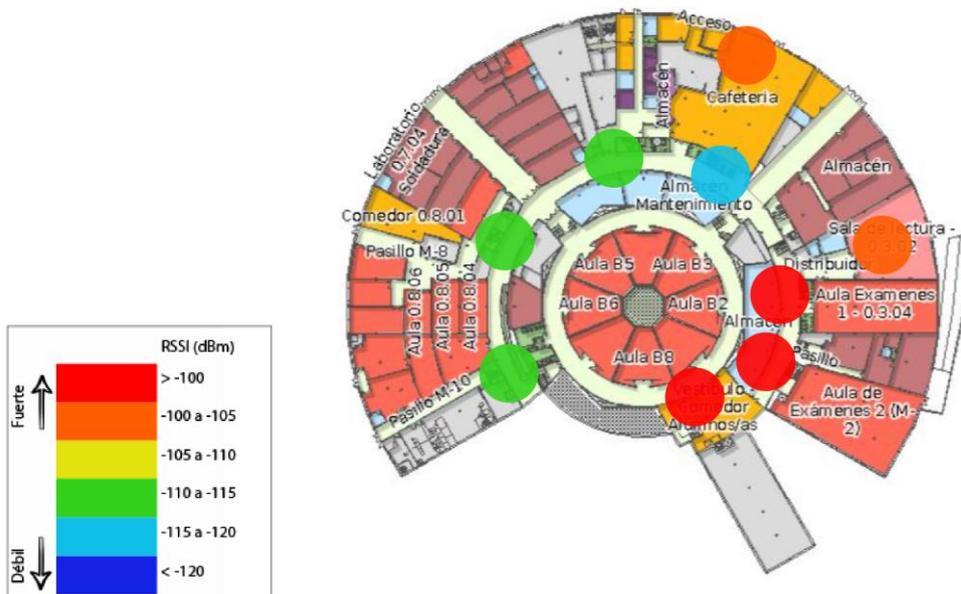


Ilustración 35 RSSI Indoor - Ed. Polivalente Planta 0

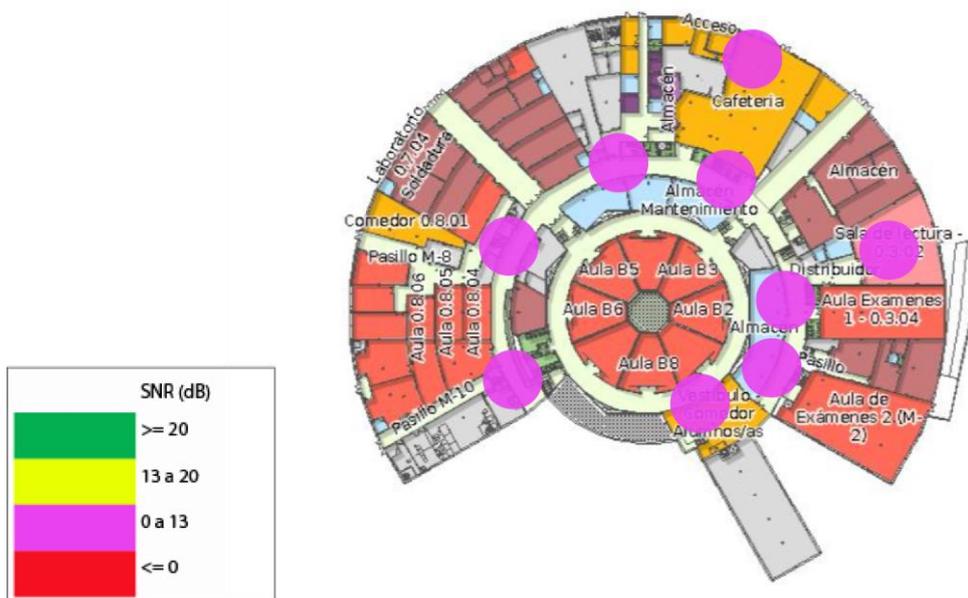


Ilustración 36 SNR Indoor - Ed. Polivalente Planta 0

6.2.2.4. Escuela de Marina, Planta 1

En la Escuela de Marina, la señal dentro del edificio resulta notablemente tenue. Esta disminución en la intensidad se debe a la mayor distancia al nodo, lo que afecta directamente a la recepción de la señal RSSI (Ilustración 39) y repercute en la constancia del SNR (Ilustración 40), aunque este último se mantiene en rangos funcionales con valor medio de 5.5 dB. El RSSI no alcanza valores mayores a -110 dBm exceptuando la entrada del edificio, donde se ha observado un RSSI de -96 dBm.

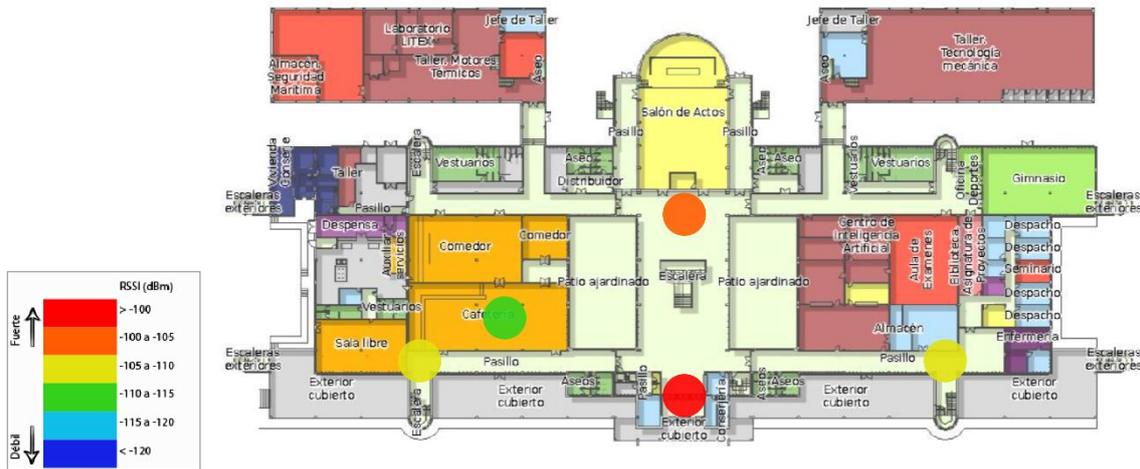


Ilustración 39 RSSI Indoor - Escuela de Marina, Planta 1



Ilustración 40 SNR Indoor - Escuela de Marina, Planta 1

6.2.2.5. Aulario Norte, Planta 1

En el Aulario Norte, se observan niveles medios de RSSI (Ilustración 41), siendo la señal más robusta en la zona de la biblioteca de intensidad -98 dBm. En cuanto al SNR (Ilustración 42), éste se mantiene constante, fluctuando en un rango de 2 dB a 4 dB, lo que refleja una recepción de señal estable a pesar de las posibles interferencias.

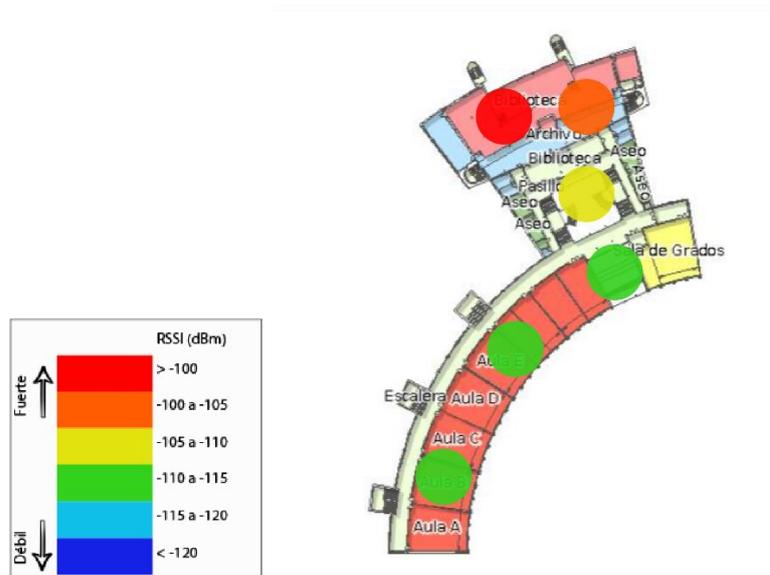


Ilustración 41 RSSI Indoor - Aulario Norte, Planta 1

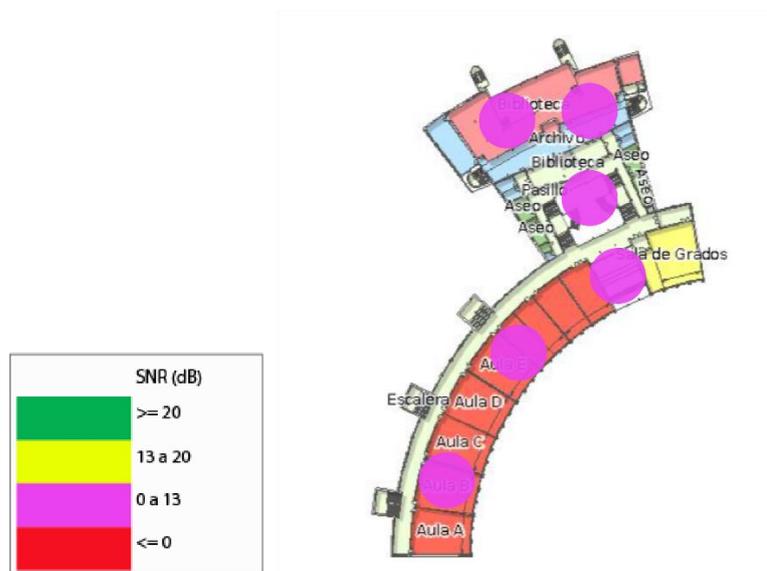


Ilustración 42 SNR Indoor - Aulario Norte, Planta 1

6.2.2.6. Aulario Sur, Planta 1

En el Aulario Sur, se registra un RSSI (Ilustración 43) notablemente bajo, no supera el valor de -116 dBm, y el SNR (Ilustración 44) alcanza valores negativos en algunos puntos (hasta -3.75 dB), lo que sugiere una recepción débil de la señal. Los bajos valores de SNR probablemente se deban a la proximidad al Parque Tecnológico, donde la presencia de múltiples dispositivos finales y *gateways* de empresas cercanas genera una mayor interferencia. El ambiente saturado de señales afecta tanto la intensidad como la calidad de conexión en el Aulario Sur.

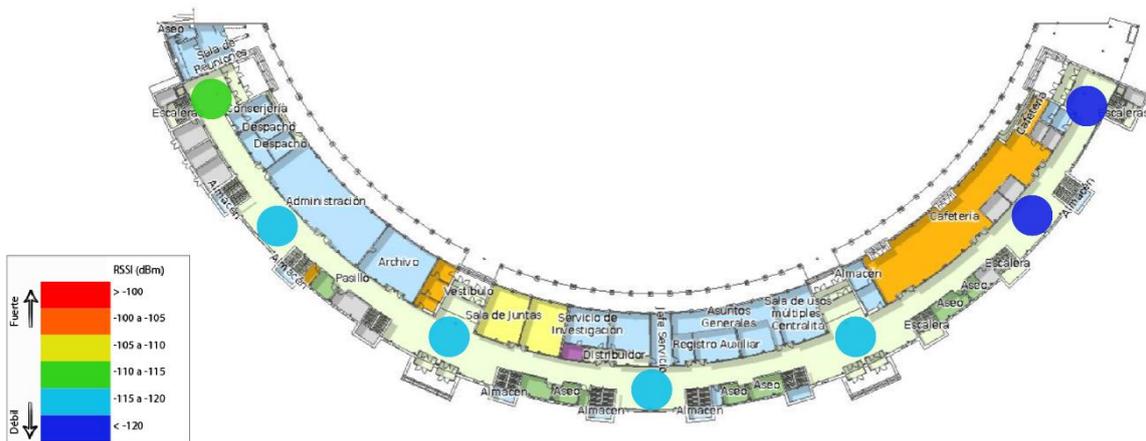


Ilustración 43 RSSI Indoor - Aulario Sur, Planta 1

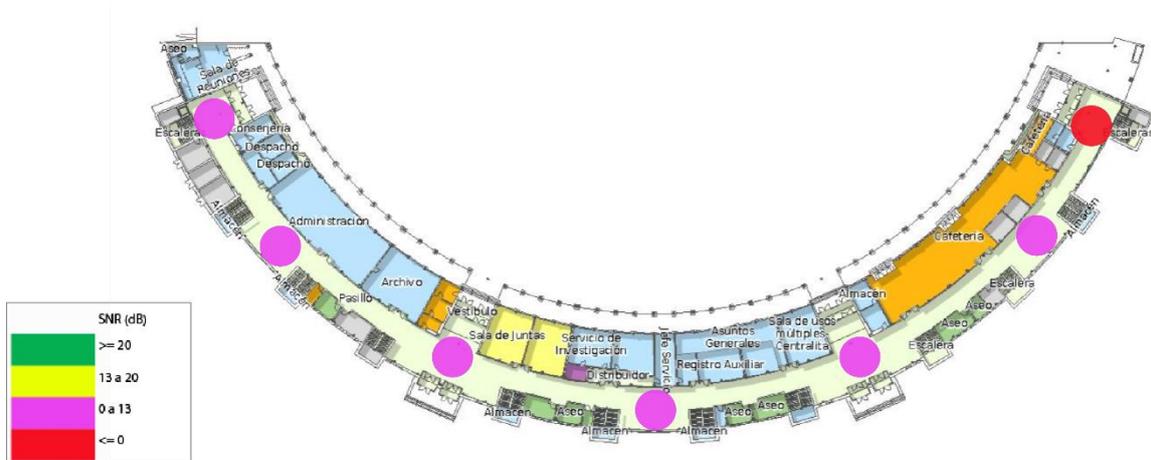


Ilustración 44 SNR Indoor - Aulario Sur, Planta 1

6.2.2.7. Departamental Este, Planta 1

En el Dpto. Este, el RSSI (Ilustración 45) raramente supera los -120 dBm y el SNR (Ilustración 46) es negativo en casi todos los puntos (entre -1.25 hasta -4 dB), reflejando una situación de recepción de señal más crítica que en el Aulario Sur. Los valores negativos del SNR podrían atribuirse, como en el caso anterior, a la cercanía con el Parque Tecnológico, donde la densidad de sensores IoT genera interferencias significativas, afectando negativamente tanto a la potencia de la señal recibida como a su calidad.



Ilustración 45 RSSI Indoor - Dpto. Este, Planta 1

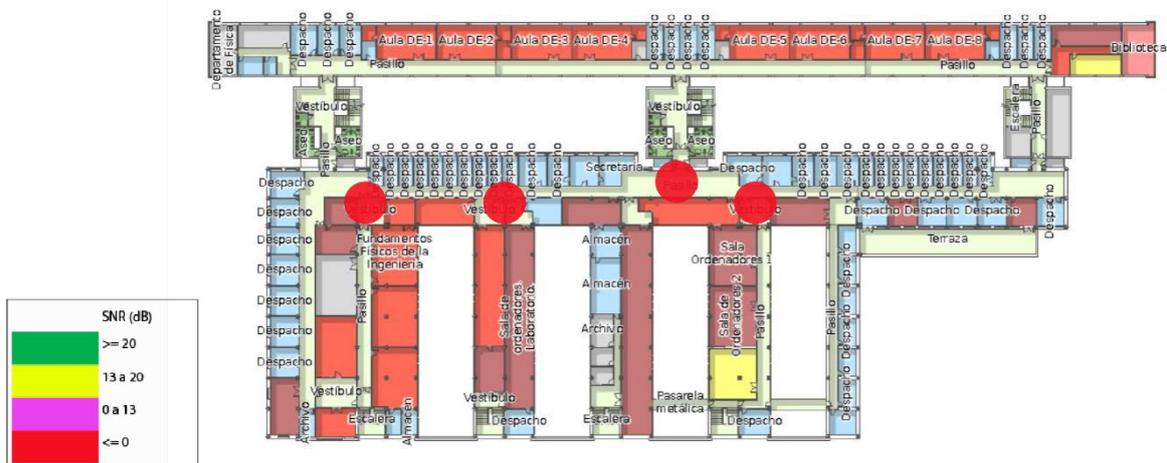


Ilustración 46 SNR Indoor – Dpto. Este, Planta 1

6.2.3. Resumen de las mediciones de cobertura

Ubicación	RSSI máximo	RSSI mínimo	SNR máximo	SNR mínimo
Campus	-80 dBm	- 140 dBm	9 dB	3 dB
Puerto Gijón	-90 dBm	-126 dBm	7.5 dB	1dB
Ed. Polivalente, Pl 1	-61 dBm	-110 dBm	8.25 dB	4.5 dB
Ed. Polivalente, Pl Baja	-90 dBm	-113 dBm	7.25 dB	5.75 dB
Dpto. Oste	-80 dBm	-110 dBm	7 dB	5 dB
Escuela de Marina	-96 dBm	-114 dBm	6.75 dB	3 dB
Aulario Norte	-98 dBm	-116 dBm	4 dB	2 dB
Aulario Sur	-116 dBm	-127 dBm	3.75	-3.75 dB
Dpto. Este	-120 dBm	-140 dBm	-4 dB	-8.75 dB

Tabla 3 Resumen de los valores máximos y mínimos de cobertura medidos

6.3. Usos satisfactorios de la red

6.3.1. Despliegue satisfactorio de dispositivos finales

La red LoRaWAN de la Universidad de Oviedo ha demostrado su operatividad a través de aplicaciones prácticas, como el desarrollo de un dispositivo electrónico para predecir crecidas del arroyo de San Miguel, contribuyendo a la prevención de inundaciones en el campus de Gijón [14].

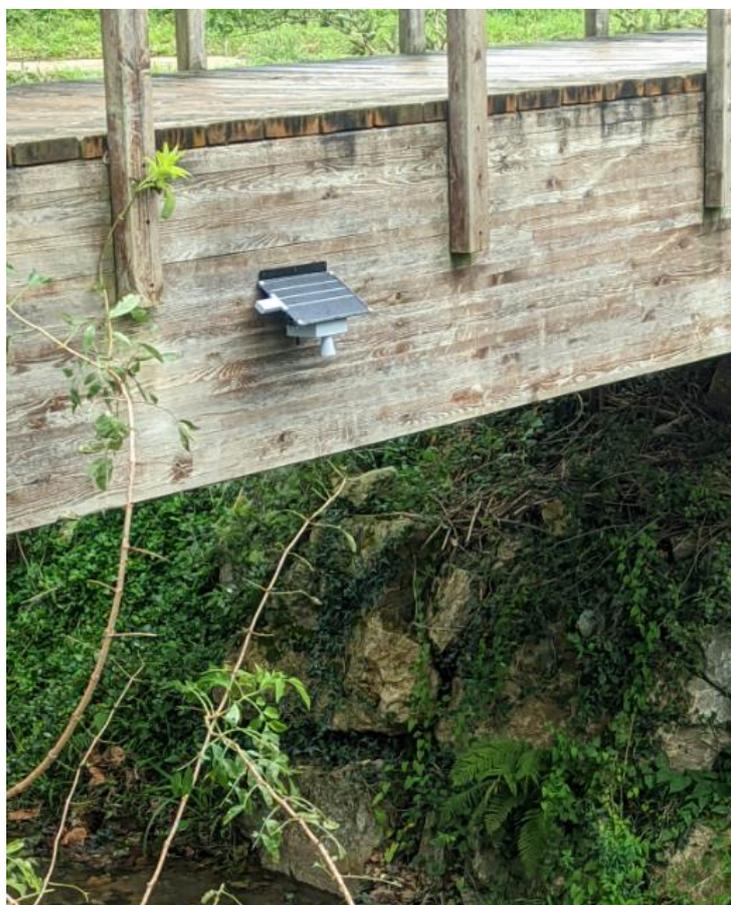


Ilustración 47 Despliegue del dispositivo encargado de medir el nivel del río (MediaLab - LPWAN)

Además, la red ha sido utilizada en un proyecto interdisciplinario donde alumnos de diferentes grados y másteres colaboraron en la creación de un "Smart Object" para la monitorización remota de parámetros climáticos. Estos desarrollos son ejemplos concretos

de cómo la red no solo está plenamente funcional, sino que también apoya la investigación y la docencia en el ámbito universitario



Ilustración 48 Despliegue del dispositivo "Smart Object" (Proyecto colaborativo, Ing. Mecánica, Ing. Telecomunicaciones, Máster Ing. Telecomunicación)

6.3.2. Análisis de cobertura en TTN Mapper

Los *beams* en TTN Mapper es una herramienta de esta plataforma que representa la comunicación de un dispositivo IoT con un *gateway* y contiene información. La longitud de cada *beam* señala la distancia a la que la señal puede ser detectada, mientras que los colores varían según la intensidad de la señal: el rojo simboliza una señal fuerte y el azul una débil. Cada haz representa un dispositivo que ha sido conectado a TTN de forma exitosa a través de la red implementada ya que ésta es de acceso público.

6.3.2.1. Gateway Outdoor – Dpto. Oeste

Como se puede observar en la Ilustración 49, el nodo exterior despliega su cobertura de manera eficaz hacia el oeste del campus, con un haz que llega hasta 1.7 km en dirección El Coto y el haz con mayor alcance llega a cubrir hasta 2.3 km.

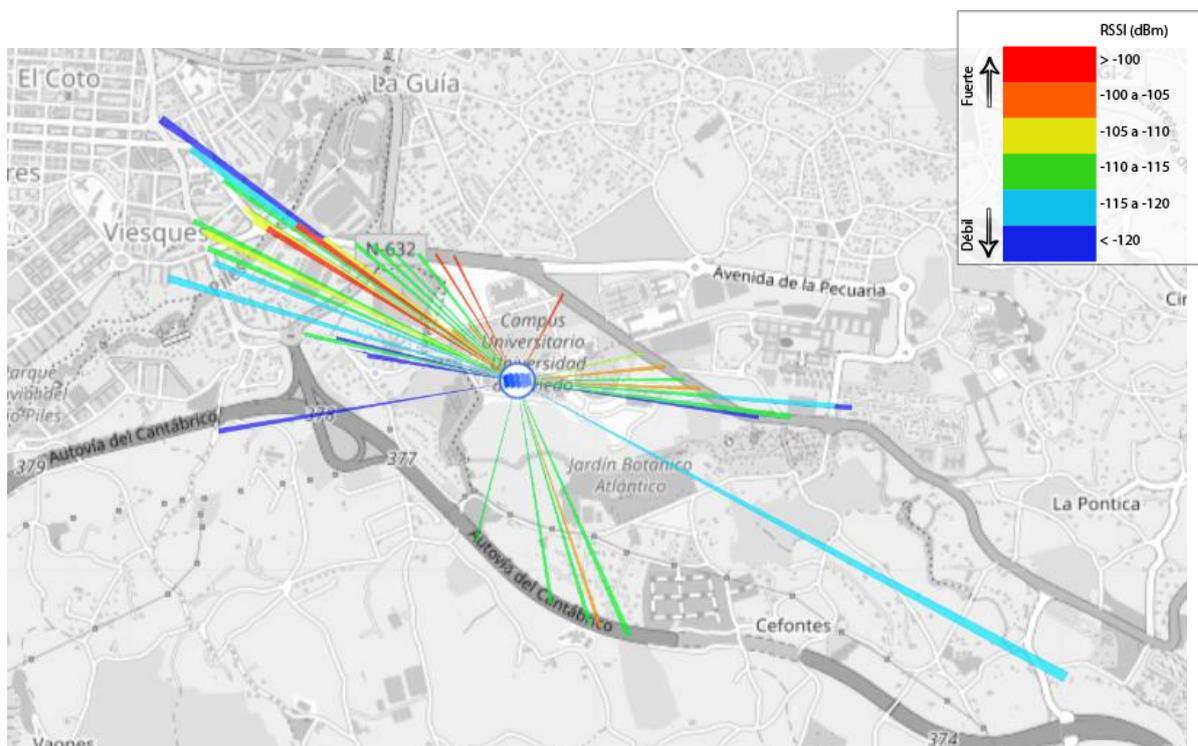


Ilustración 49 Beams del Gateway Outdoor, Campus de Gijón

6.3.2.2. Gateway Outdoor – Revillagigedo

El gateway de Revillagigedo proyecta su señal hacia el centro de Gijón, direccionándose hacia el noreste, Ilustración 50. El haz más largo se dirige hacia el sur, alcanzando una distancia de 2.5 km.

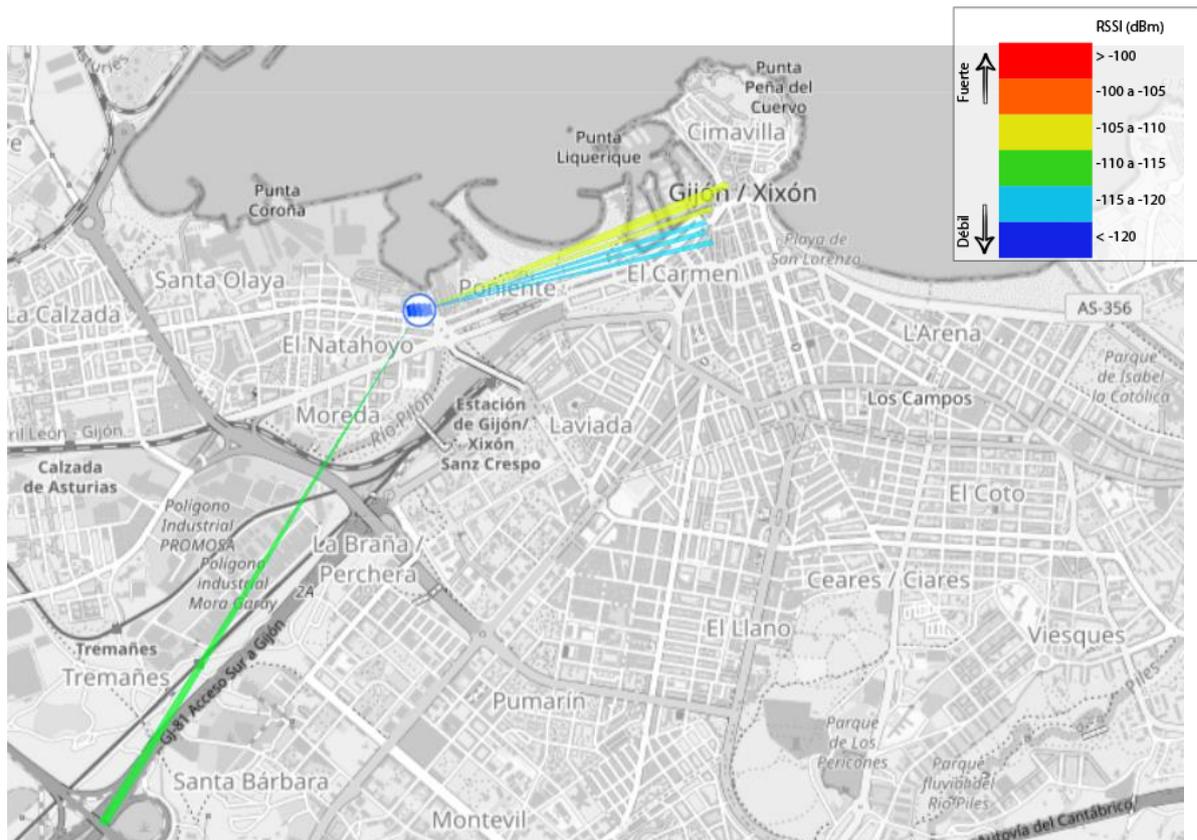


Ilustración 50 Beams del Gateway Outdoor Revillagigedo

6.3.2.3. Gateway Indoor – Laboratorio 5G

Aunque el nodo del Laboratorio 5G está ideado y desplegado de la manera que se dé cobertura interior, en la Ilustración 51 se aprecia que su alcance es mayor por las propiedades favorables de propagación de la tecnología, extendiéndose hasta 1.5 km de distancia.

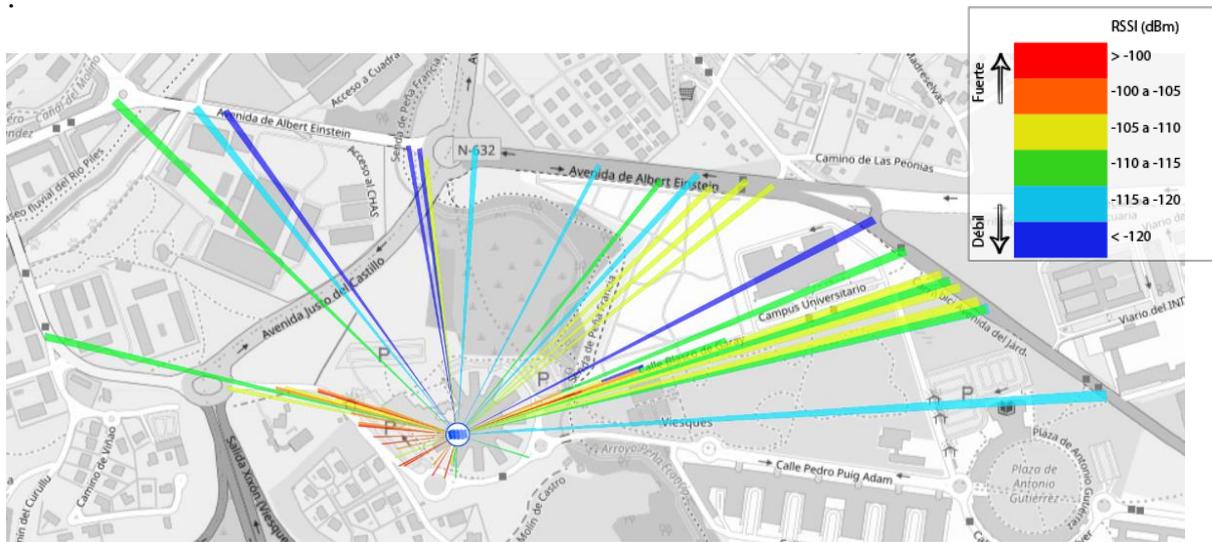


Ilustración 51 Beams del Gateway Indoor – Laboratorio 5G

6.3.2.4. Gateway Indoor – MediaLab

El nodo *indoor* de MediaLab, Ilustración 52, se distingue por tener una cobertura más densa en comparación con los *gateways* anteriores. El radio de las señales más intensas de este nodo se extiende hasta aproximadamente 1 km, mientras que los haces más largos pueden alcanzar hasta 2 km, unos resultados destacables teniendo en cuenta que se pretendía ofrecer cobertura interior. Su mayor alcance es debido a la ubicación del nodo, más elevada y próxima a una ventana con orientación oeste – noroeste.



Ilustración 52 Beams del Gateway Indoor MediaLab

7. Conclusiones

Este proyecto ha validado con éxito la implementación de una red LoRaWAN en la Universidad de Oviedo, demostrando su capacidad para satisfacer las crecientes demandas de recopilación y monitorización masiva de sensores IoT a nivel de campus. La colaboración entre distintos departamentos de investigación de la Universidad ha reforzado su alcance y viabilidad.

Se han cumplido cada uno de los objetivos planteados inicialmente.

Objetivo 1: la planificación de la red se ha realizado satisfactoriamente. Se seleccionaron las ubicaciones de los nodos estratégicamente para optimizar su alcance y una distribución uniforme de la cobertura.

La Tabla 1 recoge las características de las localizaciones estudiadas.

Objetivo 2: Los nodos se desplegaron de manera eficiente siguiendo las instrucciones del Anexo 1, “Manual de Instalación. *Gateway* Mikrotik”. Los problemas que surgieron durante el despliegue se solucionaron satisfactoriamente quedando todos los nodos activos hasta la fecha de hoy: exteriores, Dpto. Oeste, Módulo 3 y Centro FP Revillagigedo; interiores, Cátedra Thin5G y MediaLab.

La Tabla 2 proporciona la información técnica sobre los *gateways* instalados.

Objetivo 3: Se ha diseñado un dispositivo medidor de la calidad de cobertura que proporciona los parámetros RSSI y SNR de la señal en la ubicación donde ésta se esté midiendo. Se analizó el alcance de la cobertura de cada *gateway*: 2.3 km *outdoor* en el campus y 2.5 km *outdoor* en el puerto de Gijón. De esta manera, se ha validado la eficacia y la viabilidad de la red desplegada.

En la Tabla 3 se resumen todas las ubicaciones analizadas con los valores pico de RSSI y SNR.

Por último, analizando las mediciones de cobertura en todas las localizaciones se puede sacar un cierto patrón de comportamiento de la señal:

- El RSSI aumenta a medida que el dispositivo medidor se acerca al *gateway* y viceversa.
- El SNR empeora si el dispositivo se encuentra rodeado de obstáculos físicos (paredes, árboles, etc) o cerca de otros dispositivos que generan señales de interferencia.
- El RSSI y el SNR no necesariamente serán proporcionales. Generalmente, el SNR se mantiene con valores estables, positivos, incluso si la intensidad de la señal disminuye drásticamente.

En conclusión, la red IoT queda totalmente funcional proveyendo una cobertura de calidad.

7.1. Consideraciones futuras

Considerando el estado actual de la arquitectura de red implementada, se propone una serie de ampliaciones y posibles estudios futuros:

- Despliegue de más nodos en diferentes localizaciones: campus de Oviedo, campus de Mieres, la Laboral de Gijón.
- Reemplazar la plataforma *backend* TTN por un servidor de red corporativo de la Universidad.
- Integrar el servidor de red con los sistemas de la Universidad.
- Dar soporte a actividades de investigación y/o docencia.

- Realizar análisis estadístico de los datos recopilados, establecer modelos de propagación, etc.

Estas consideraciones futuras forman parte del abanico de posibilidades que el despliegue de la red abre tanto para la institución como para el personal académico y estudiantil.

8. Referencias

- [1] United Nations, “The Sustainable Development Agenda 2030,” United Nations Sustainable Development, [En línea]. Disponible en: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. [Último acceso: 2024]
- [2] I. N. E. “Encuesta sobre el uso de TIC y del comercio electrónica en empresas,” INE, 2019-2020
- [3] C. Petrov, L. Tonogbanua, “Techjury,” 2021. [En línea]. Disponible en: <https://techjury.net/blog/internet-of-things-statistics>. [Último acceso: 2024]
- [4] D. Reinsel y otros, “book.itep,” Agosto 2018. [En línea]. Disponible en: http://book.itep.ru/depository/dig_economy/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf. [Último acceso: 2024]
- [5] Paessler, “Paessler,” 2020. [En línea]. Disponible en: es.paessler.com/it-explained/lpwa. [Último acceso: 2024]
- [6] F. Campos, “m2mlogitek,” Logitek, Julio 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.m2mlogitek.com/lpwan-que-son-y-para-que-se-utilizan/>. [Último acceso: 2024]
- [7] L. A. “Lora Alliance,” 2021. [En línea]. Disponible en: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>. [Último acceso: 2024]
- [8] I. Rodríguez Larrad, “IoT Wireless Technologies & Intro to LoRaWAN & Uniovi LoRaWAN Network,” 2023, p.40
- [9] M. García, “Estudio de coberturas radioeléctricas proporcionadas por el sistema inalámbrico LoRa en Cartagena e implementación de una red LoRa propia,” Junio 2020. [Último acceso: 2024]
- [10] I. Aguilar Almazo, “Evaluación experimental de modelos de radiopropagación mediante una red de sensores inalámbricos,” 2019. [Último acceso: 2024]

- [11] P.J. López de Tejada Irizo, “Estudio de cobertura de una red de sensores inalámbricos usando distintos tipos de antenas,” 2018. [Último acceso: 2024]
- [12] C. Méndez Sanmartín, “Diseño y desarrollo del sistema de comunicaciones inalámbrico de un enjambre de UAV’s colaborativos,” Junio 2017. [Último acceso: 2024]
- [13] I. Rodríguez Larrad, “IoT Wireless Technologies & Intro to LoRaWAN & Uniovi LoRaWAN Network,” 2023, p.39
- [14] Europa Press Asturias, “La Universidad de Oviedo diseña un dispositivo para predecir posibles inundaciones en el campus gijonés,” Enero 2024. [Último acceso: 2024]