



MODELO DE RED LoRa PARA LA AGROINDUSTRIA

Trabajo Final de Grado
Ingeniería en Telecomunicaciones
Ingeniería Electrónica

Integrantes

María Eugenia Araújo Martín
Ariel Ismael Dagnino Presa

Tutor

Alfredo Arnaud

Agradecimientos

En primer lugar, queremos agradecer a la Universidad Católica del Uruguay, institución que nos acompañó en todo este camino, que nos abrió sus puertas mediante becas estudiantiles, y que gracias a ellas, pudimos desarrollarnos como profesionales y crecer como personas.

Al proyecto NEON por el apoyo a la hora de conseguir los equipos necesarios para llevar a cabo el proyecto y a Nicole Imbert por ayudarnos con la logística a la hora de importarlos.

A nuestro tutor Alfredo Arnaud, por sus valiosos consejos y por acompañarnos en este trabajo final de grado.

A nuestros amigos, quienes nos alentaron, aconsejaron y festejaron con nosotros tantos logros alcanzados en este proceso.

Y por último y no menos importante por ello, a nuestras familias, quienes fueron, son y serán siempre los responsables de que todo esto ocurriera.

¡Muchas gracias a todos!.

Eugenia y Ariel.

Resumen

La Agroindustria presenta desde hace algunos años la oportunidad y la necesidad de aprovechar la tecnología existente para mejorar sus procesos, con herramientas enfocadas en la reducción de costos y que apoyen la toma de decisiones.

En este marco, surge este trabajo de grado en Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, que presenta un modelo de red inalámbrica para conectar diversos sensores en unidades de producción en la agroindustria (Nodos)¹. Pueden ser sensores de presión, humedad, temperatura, geolocalización, etc. Incluso sensores innovadores aún no desarrollados. El trabajo se realizó sobre la tecnología LoRa/LoRaWAN² y tiene como objetivo plantear un modelo de red inalámbrica ajustado a un predio agroindustrial de mediano porte en Uruguay.

El trabajo se enmarca dentro de las actividades del Grupo de Microelectrónica en la Universidad Católica (<https://die.ucu.edu.uy/microdie>), que desde hace un tiempo también trabaja una línea de Internet de las Cosas (IoT) especialmente para aplicaciones de la agroindustria y alimentos. En los últimos años se realizaron varios proyectos usando protocolos LoRa y otros LPWAN para conectar sensores a través de Internet pero siempre fueron aplicaciones puntuales, nunca se visualizó la red del establecimiento rural en su conjunto con múltiples sensores de diferente índole. Tampoco se realizaron pruebas con muchos nodos sensores, sino que las pruebas se limitaron a uno o dos nodos sin exigir la red y el caso de muchos sensores solamente ha sido simulado. Este trabajo viene a completar ambos aspectos:

En primer lugar se plantea un modelo de red IoT para la realidad de predios agroindustriales en Uruguay, en segundo lugar se realizan pruebas de campo con un único nodo para el estudio de performance del sistema y finalmente se implementa una plataforma para pruebas de hasta 35 nodos alimentados a batería emulando el modelo planteado y escalable para emular muchos más sensores.

¹ *Nodo: Dispositivo de origen o destinatario final de un mensaje en una red.*

² *LoRa: (Long Range) Es un tipo de modulación empleada por dispositivos para la comunicación a largas distancias.*

LoRaWAN: (Long Range Wide Area Network) Es la especificación para redes de baja potencia y gran área de alcance mediante la tecnología LoRa.

Esta tesis de grado se enmarca dentro del apoyo del proyecto NEON (<http://neon-iot.org/>), cuyo objetivo es mejorar y diversificar la formación de recursos humanos en el área de IoT (Internet of Things) en Argentina, Uruguay y la CE.

Abstract

From some years ago until now the agroindustry has shown the opportunity, and the need, to take advantage of the technology that already exists to enhance their processes with tools that focus on the reduction of costs and that support the decision making processes.

Is in this scenario that this project, to complete the Telecommunications and Electronics Engineering degree, is based. It presents a wireless network model to connect different sensors in different agroindustry production units (nodes). They can measure pressure, humidity, temperature, geolocalization, etc. Or even innovating sensors that have not been developed yet. The project is about the LoRa/LoRaWAN technology and its goal is to present a wireless network model that can be adjusted to an Uruguayan middle sized agroindustrial property.

The project is related to the activities of the Microelectronic Group in the Universidad Católica (<https://die.ucu.edu.uy/microdie>), this group has been working with Internet of the Things (IoT) for a while now, specially for applications related with the agroindustry and the food industry. Lately a lot of projects using LoRa and LPWAN protocols to connect sensors through the Internet have been made, but always with a predetermined application, any of them visualized the rural property network as a set of different sensors. Tests including multiple sensors haven't been made either, the tests were always limited to one or two nodes without forcing the network to work under a bigger demand, this case scenario was only simulated. This project comes to complete both aspects:

First, an IoT network model is presented for the reality of the agroindustrial properties in Uruguay, then field tests are done with only one node to study the performance of the system and finally a tests platform is implemented to test the network with up to 35 nodes powered with batteries, emulating the presented model and with the possibility to be escalated to emulate much more sensors.

This project is supported by the NEON project (<http://neon-iot.org/>), whose goal is to improve and diversify the human resources' formation in the IoT (Internet of Things) field in Argentina, Uruguay and the EU.

ÍNDICE

ÍNDICE	7
GLOSARIO	9
CAPÍTULO 1	14
1. Introducción	14
1.1. Desafío planteado	15
1.1.1. Modelado	15
1.1.2. Pruebas de campo	16
1.1.3. Desarrollo de plataforma de prueba	16
1.2. Estado del Arte	17
1.3. Objetivo	18
CAPÍTULO 2	19
2. Agroindustria	19
2.1. Necesidades detectadas	19
2.2. Soluciones comerciales actuales	24
2.3. Estudios actuales de soluciones	29
2.4. Modelo adecuado a la agroindustria	31
CAPÍTULO 3	37
3. Requerimientos del proyecto	37
3.1. Consumo de batería	37
3.2. Alcance de comunicación	39
3.3. Eficacia de transmisión	40
3.4. Actualización remotas	40
3.5. Multiplicidad de nodos	40
CAPÍTULO 4	42
4. LoRa	42
4.1. Sistemas IoT	42
4.2. LoRa	44
4.2.1. Frecuencias de LoRa	46
4.2.2. Spreading Factor	47
4.3. LoRaWAN	48
4.3.1. Topología	49
4.3.2. Clases de dispositivos finales	50
4.3.3. Tasa de transmisión de información	51
4.3.4. Seguridad	52

CAPÍTULO 5	54
5. Normativa	54
5.1. Internacional	54
5.2. En Uruguay	56
5.2.1. Parámetros Regionales para la banda de frecuencia US902-928	56
5.2.2. Limitaciones en flujo de datos	58
CAPÍTULO 6	59
6. Elección del Hardware	59
6.1. Gateway	59
6.2. Nodo	62
6.2.1. Estudio de módulos de comunicación LoRa (Transceptor)	63
6.2.2. Antena	65
6.2.3. Controlador/Sensores	65
6.2.4. Nodo definido	68
CAPÍTULO 7	71
7. Elección del Software	71
7.1. Servidor	71
7.2. Aplicación cliente	74
CAPÍTULO 8	77
8. Implementación	77
8.1. Pruebas de campo con nodo único	77
8.1.1. Alcance	78
8.1.2. Velocidad	82
8.1.3. Autonomía	84
8.1.4. Confiabilidad	86
8.1.5. Actualizaciones remotas	87
8.2. Desarrollo de plataforma de prueba, simulación modelo	90
8.2.1. Estudio de colisiones, eficacia de transmisión	91
8.3. Resolución de limitantes del proyecto	101
CAPÍTULO 9	103
9. Conclusiones	103
ANEXO A	106
ANEXO B	110
BIBLIOGRAFÍA	113

GLOSARIO

AES	Estándar avanzado de encriptación por bloques (Advanced Encryption Standard)
AI	Inteligencia Artificial (Artificial Intelligence).
Cloud, Nube	“The Cloud” Refiere al conjunto de software, servidores y servicios que funcionan sobre internet.
Batería primaria	Batería no recargable.
Batería secundaria	Batería recargable.
CPU	Unidad de procesamiento central (Central Processing Unit).
CSS	(Chirp Spread Spectrum) Tecnología de modulación digital bajo el estándar IEEE 802.15.4aCSS.
End-Point	Dispositivo final integrante de una red de comunicación.
Gateway	Equipo que actúa como enlace de comunicación entre dispositivos.

GPS	Sistema de geolocalización (Global Positioning System).
GSM	Estándar global para comunicación digital de dispositivos móviles. (Global System for Mobile).
HAS	Hectárea, unidad de medida de superficies equivalente a 10000 m ² .
HTTP	Protocolo de transferencia de hipertexto (Hypertext Transfer Protocol).
IEC	Comisión electrotécnica internacional (International Electrotechnical Commission).
IEEE	Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos que proporciona estándares técnicos e intercambio internacional de información en electrotecnología (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
IoT	Internet de las cosas (Internet of Things).
IP	Protocolo de identificación de dispositivos en internet.
ISM	Bandas de radio frecuencia en espectro reservado para la industria, ciencia y equipos médicos sin protección regulatoria.
ITU	Agencia global de las Naciones Unidas que coordina las operaciones y servicios de telecomunicaciones en el mundo (International Telecommunications Union).
JSON	Acrónimo de objeto en lenguaje de programación JavaScript.
LAN	Red de área local (Local Area Network).
LoRa	Tecnología de comunicación de largo alcance y baja potencia.
LoRaWAN	Protocolo de red que utiliza la tecnología LoRa.

LPWAN	Red de área amplia de baja potencia (Low-Power Wide-Area Network).
M2M	Tecnologías de comunicación directa entre dispositivos (Machine to Machine).
MCU	Unidad de microcontrol (MicroController Unit).
MQTT	Protocolo de comunicación para IOT basado en el estándar OASIS.
NB-IoT	Estándar de comunicación de banda estrecha diseñado para la optimización del uso de batería (NarrowBand Internet of Things).
Nodo	Sensor o dispositivo diseñado para la recolección de datos y capaz de procesar datos y enviarlos.
PC	Computador personal (Personal Computer).
PCB	Placa de circuito impresa (Printed Circuit Board).
PH	Medida de acidez o alcalinidad de una solución acuosa, comprendido entre -1 y 15.
RFID	Identificación por radiofrecuencia (Radio Frequency Identification).
RPMA	Tecnología inalámbrica desarrollada para IOT y aplicaciones M2M (Random Phase Multiple Access)
RSSI	Indicador de fuerza de señal recibida (Received Signal Strength Indicator)
RX	Estado de recepción de datos en nodo o transceptor.

SCRIPT	Término informático para asociar a un fragmento o a un programa en sí, con una función simple.
SF	Factor de dispersión LoRa (Spread Factor).
Sigfox	Tecnología propietaria de comunicación inalámbrica de dispositivos de baja potencia.
SNR	Relación señal-ruido (Signal to Noise ratio)
TOA	Tiempo de vuelo, que determina la demora de transmisión de una señal de radio desde que se emite hasta que se recibe (Time On Air).
TX	Estado de transmisión de datos en un transceptor o nodo.
UHF	Ultra Alta Frecuencia @860-970 MHz (Ultra High Frequency)
WAN	Red de área amplia (Wide Area Network).
Wi-Fi	Conjunto de protocolos de red basados en el estándar IEEE 802.11 para dispositivos LAN y acceso a internet.
WLAN	Red de área local inalámbrica (Wireless Local Area Network).
WPAN	Red de área personal inalámbrica (Wireless Personal Area Network).
Zigbee	Conjunto de protocolos para la comunicación de dispositivos a baja potencia y estrecho ancho de banda basados en el estándar IEEE 802.15.4 para WPAN y WLAN.

CAPÍTULO 1

1. Introducción

Las nuevas tecnologías como el RFID e IoT están cambiando rápidamente los sistemas de producción dentro de la agroindustria, desde la granja o la industria ganadera, porcina y avícola, la producción de cereales, la industria maderera, o la piscicultura y la pesca. La agroindustria es un mercado enorme que aún carece de una adopción masiva de tecnología. En la actualidad existe la necesidad y la oportunidad de ampliar muchísimo el uso de sensores conectados utilizando el hardware de bajo costo disponible y las nuevas plataformas de IoT [1]. Dentro de ese universo de tecnologías, este proyecto trabajará con una red LoRa [1][2] para un predio agroindustrial, asumiendo que es la opción que mejor se adapta al caso de estudio por su buen compromiso entre costo (ya que es una red de uso libre mediante el espectro ISM) y performance. A modo de resumen: para aplicaciones en la agroindustria se necesita desplegar un número importante de sensores, de muy bajo costo, alimentados a batería, transmitiendo una baja tasa de datos a distancias de hasta unos pocos kilómetros.

En la Universidad Católica en el pasado se han desarrollado proyectos de dispositivos conectados a una red LoRa tales como un detector para celo en ganado vacuno [3], una etiqueta electrónica [4], un sensor de luminarias para pista de aeropuerto [5] entre otros. En todos estos proyectos se desarrollaron uno o unos pocos prototipos operativos. Sin embargo la red LoRa está concebida para conectar

miles de nodos, lo que trae problemas a considerar, como la estrategia de conexión y onboarding, actualización remota de firmware, colisiones, etc [6]. Este proyecto plantea una primera aproximación al trabajo práctico con múltiples nodos, tomando el caso real de una unidad de producción rural modelo donde cientos o miles de nodos transmiten información para el registro histórico, reportar alarmas, aportar información para la toma de decisiones, optimizar la producción, etc.

Cabe aclarar que no se trata de un predio rural real específico, sino un predio hipotético, acorde a las características de la producción agroindustrial en Uruguay, pero ideal en el sentido que estaría altamente tecnificado con múltiples sensores conectados en todo punto donde fuese de utilidad. Parte del modelo a desarrollar es precisamente describir este predio.

Si bien no se plantea solucionar todos los problemas que trae aparejado, si se pretende por un lado desarrollar un modelo para este tipo de establecimiento rural ideal altamente tecnificado, y por otro lado desplegar una red LoRa con un número importante de sensores alimentados a batería, emulando el modelo planteado. Se plantea desarrollar una plataforma real para probar estrategias de optimizar la red, minimizar colisiones, actualizar firmware en forma remota, optimizar la duración de la batería de los nodos, etc.

1.1. Desafío planteado

En una primera instancia se realizará un análisis detallado de la aplicación de una red LoRa en un predio rural tipo en Uruguay, para ello se tendrá en cuenta la normativa vigente en Uruguay y se realizarán entrevistas a productores, expertos, y visitas a predios rurales a efectos de determinar las necesidades existentes o futuras . Se realizará en profundidad una búsqueda bibliográfica y de proveedores, de iniciativas y proyectos. Este estudio será la base para las dos etapas planteadas en el presente desafío, donde se buscará primariamente generar un modelo de red, para luego desarrollar pruebas de campo de baja escala y un posterior desarrollo de una plataforma de prueba a escala que permita emular y no solo simular el modelo planteado.

1.1.1. Modelado

Para el modelo de la red se parte de la hipótesis de que se utilizará un solo gateway y múltiples sensores con distintas aplicaciones en el predio, por ejemplo:

- Geolocalización de animales, vehículos dentro del predio.
- Monitoreo de alambrado (hilos caídos, sensor de voltaje en alambrado eléctrico).
- Cámaras fijas para registro esporádico de imágenes.
- Humedad de suelo
- Temperatura a nivel de suelo

Se analizará en profundidad las tres primeras aplicaciones mencionadas, dimensionando el problema (tecnología, transferencia de datos), buscando referencias y proveedores para alguna de ellas. Además se estudiará la posibilidad de actualización de firmware de forma remota, el alcance de la distancia de comunicación y las posibilidades de colisión en función del número de nodos.

1.1.2. Pruebas de campo

Se diseñará un nodo LoRa simple alimentado a batería y se desplegará una red LoRa básica de al menos un nodo en un predio rural o en las instalaciones de la UCU. Una vez realizado el análisis y diseño de la red LoRa en un predio rural tipo en Uruguay, se emulará alguna de las aplicaciones estudiadas utilizando la red desplegada. Esto nos permitirá evaluar en forma empírica los problemas ya estudiados de forma teórica en la primera instancia (posibilidades de actualización de firmware, el alcance de la distancia de comunicación y las posibilidades de colisión en función del número de nodos). Por otra parte, la utilización de una importante cantidad de nodos permitirá estudiar cómo mantener el monitoreo de tantos nodos a la vez.

1.1.3. Desarrollo de plataforma de prueba

El propósito de esta red es la creación de una plataforma que permita evaluar diferentes estrategias de trabajo con nodos reales en campo, ya que permitirá obtener información del funcionamiento de la red en diferentes condiciones mediante la modificación de algún parámetro, como puede ser distancia de los nodos al gateway, variación del número de nodos, modalidad de funcionamiento, etc. Esta etapa final buscará poner en práctica el modelo planteado y observar posibles inconvenientes prácticos bajo pruebas de estrés del sistema con múltiples nodos conectados en simultáneo.

1.2. Estado del Arte

A partir del año 2018 se comenzaron a realizar estudios en Uruguay a nivel universitario sobre tecnologías IoT [3],[4],[5],[7],[8].

En este contexto, no se observan registros de estudio en modelos de red IoT para la agroindustria en Uruguay como se plantea en este documento. Existen estudios de aplicaciones específicas como sensores de telemetría de luminarias para aeropuertos [5], redes de sensado para riego [9], aplicaciones para Smart Cities y estudios de seguridad para este tipo de redes [7].

En Sudamérica, existen varios estudios de redes inalámbricas para la agroindustria. Por ejemplo, un estudio realizado en la Universidad de Bio Bio en 2019 [10], que implementa una red de dispositivos para optimizar la gestión de productos agrícolas, con una conclusión muy buena en cuanto a desempeño y alcance de señal, contando con ensayos satisfactorios a 15 km en cultivos de arándanos.

Por su parte, un artículo de la Universidad de Piura en Perú del año 2019 [11], remarca la utilidad de la tecnología LoraWAN en aplicaciones en la agroindustria, dada la lenta variabilidad de los procesos, el bajo costo de implementación y el gran alcance de cobertura, comparando incluso su desempeño respecto a la tecnología Sigfox. Comenta adicionalmente que la capacidad de comunicación bidireccional, así como multicast, permiten un uso eficiente del espectro que favorecen tareas tales como la actualización remota de firmware. Sin embargo, se recomienda en el

documento desestimar esta tecnología para la transmisión de gran cantidad de datos, como pueden ser imágenes o videos, entendiendo que no brindará buenos resultados.

En Uruguay se encuentran empresas tales como TelloT³, BQN⁴, FOCUS⁵, INDATA⁶ entre otras, que han desarrollado productos o proyectos basados en esta tecnología.

1.3. Objetivo

En esta tesis de grado se presenta un doble objetivo. En primer lugar el desarrollo de un modelo de IoT para un predio agroindustrial típico en Uruguay utilizando una red LoRa propietaria, y en segundo lugar la implementación de una plataforma que permita realizar pruebas de campo con un número importante de sensores LoRa.

³ <http://www.teliot.io/>

⁴ <https://bqn.com.uy/>

⁵ <https://www.focusingeneria.com.uy/>

⁶ <https://indata.uy/lora/>

CAPÍTULO 2

Agroindustria

2.1. Necesidades detectadas

Según el informe de Uruguay XXI [12] sobre las exportaciones efectivizadas en los últimos años, 7 de de los primeros 10 artículos exportados en el año 2021 fueron producto directo del sector agroindustrial.

Nro.	Bienes	MMUSD
1	Carne y despojos comestibles.	2.843
2	Madera, carbón vegetal	1.107
3	Semillas y frutos oleaginosos	1.050
4	Leche y productos lácteos	769
5	Combustibles minerales, materias bituminosas	607
6	Cereales	607
7	Plásticos y sus manufacturas	297
8	Productos de la molinería;malta;almidon	226
9	Grasas y aceites animales o vegetales	221
10	Animales vivos	205

Tabla 1: Primeros diez artículos más exportados de 2021 según el informe de Uruguay XXI [12].

Con una evolución en ascenso en gran parte de ellos desde hace veinte años.

Sin embargo, hay tendencias desfavorables en algunos sectores, como lo son la producción de aceites vegetales derivados de frutos y semillas, la actividad lechera y la producción de cereales.

Según un artículo del semanario “La Mañana” [13], hay varios factores que influyen en la producción de leche, pero se observa una gran necesidad de incluir tecnología para mejorar la eficiencia en sus procesos, donde la mano de obra es cada vez más escasa. Los mayores obstáculos para incluir tecnología, son los costos asociados, la generación de propuestas atractivas y bien fundamentadas, y la resistencia sindical a eventuales sustituciones de personal.

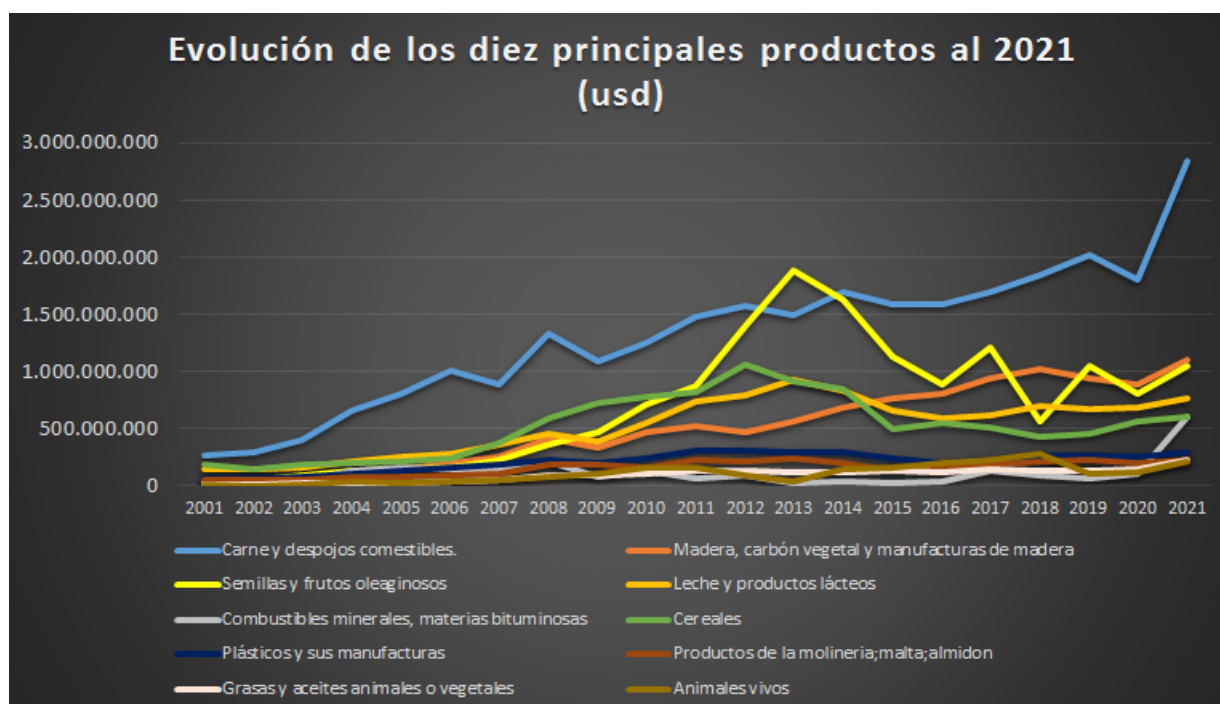


Figura 1: Evolución de los diez principales productos exportados al 2021 en USD (Fuente Uruguay XXI [12]).

En cuanto a la producción de cereales y productos oleaginosos; el trigo, la cebada, el maíz y la soja son predominantes en territorio uruguayo. En todos ellos, los principales factores de productividad son la selección de semillas, el clima, control

de malezas y por sobre todo, ejecutar adecuados planes de sanidad vegetal para prevenir la aparición de plagas que eliminen o disminuyan la productividad.

En particular para el caso del trigo, la tecnología puede ser beneficiosa en la obtención de indicadores de presencia de plagas, como los llamados “Pulgones”, orugas y “Chinches”.

Otro factor que disminuye la productividad, es la presencia de hongos o enfermedades foliares que afectan la coloración y el desarrollo del cultivo, los cuales tienen estrecha relación con los niveles de humedad y temperaturas presentes, donde al presentarse la combinación adecuada de estos, puede favorecerse la aparición [14].

Por lo tanto, bajo un control adecuado de elementos como la temperatura, humedad, coloración y presencia de insectos, pueden darse alertas para la toma adecuada de decisiones en cuanto a la fumigación, riego y a futuras siembras.

Respecto a la producción ganadera, existen características dispares entre la ganadería extensiva y familiar, la cual se enfrenta desde hace un tiempo a grandes dificultades por la baja eficiencia productiva, sin embargo, en todos los casos se observa un bajo conocimiento de opciones tecnológicas y problemas en los diseños de los sistemas de producción causados por la falta de información [15].

Los Gaps productivos en este sentido, refieren principalmente al control natal, de celo, de alimentación, enfermedades infecciosas y presencia de parásitos. Estudios realizados por el INIA⁷ sobre la adopción de tecnologías en 2017 [16], indican que un 28.1% de los productores consultados (51 en total con campos de 200 Has a 500 Has) manifestaron haber sufrido presencia de enfermedades infecciosas en sus ganados, solo el 27,5% evalúan con un veterinario sus toros y sus capacidades reproductivas, y cerca de la mitad de estos productores comentaron haber sufrido la presencia de parásitos en el ganado con afectación tanto en el engorde como en la

⁷ INIA: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria_ <http://www.inia.uy/>

reproducción. Todos estos casos de sanidad del ganado, se fundamentan en un bajo control preventivo y bajo control en la vacunación de cada animal.

Por otra parte, un factor visto como muy importante desde los productores ganaderos, es el control del abigeato y la seguridad de sus establecimientos.

Adicionalmente al estudio de condiciones agropecuarias y ganaderas de Uruguay desde la perspectiva de exportaciones, se realizaron consultas a pequeños productores de menor escala para entender sus realidades y necesidades.

Se consultó a dos productores de canelón chico dedicados a la producción de calabacines, remolachas, hojas verdes y en su pasado con viñedos y tomate industrial. Sus comentarios fueron que los factores principales que pueden ser controlados para una buena producción a bajo costo, eran un adecuado control de



Figura 2: Plantación de campo productor consultado, 5 Has. Imagen satelital del predio mediante Google Maps.

humedad de la tierra y fumigaciones según condiciones (evaluando la planta para evitar aumento de costos inadecuados por fumigaciones innecesarias).

Ambos factores son parte del proceso que encarecen el producto y de no hacerlo

correctamente, pueden ser muy

graves para la producción.

Comentaron además que la energía eléctrica para el riego es de alto costo y que en general no se utiliza ningún sistema inteligente para un control adecuado del riego. Si hay zonas del campo que requieren regarse y otras que no, no está contemplado

en la rutina diaria, se riega todo por igual. Observan que es muy importante el monitoreo de la humedad a nivel de suelo para optimizar el uso de agua, y por consiguiente, el buen uso de energía eléctrica.

Respecto a la fumigación, el controlar rutinariamente si existe presencia de plagas u hongos es sumamente importante y requiere una gran dedicación. Entienden

qué dispositivos de bajo costo que realicen el monitoreo de la coloración, presencia de insectos o la presencia/ausencia de algunos minerales en la tierra, podrían reducir el tiempo dedicado al control, mejorar su modo de fumigar e incluso de fertilizar para aumentar la productividad de futuras siembras.



Figura 3: Ubicación de uno de los campos consultados. Imagen de sitio mediante Google Maps.



Figura 4: Campos por cosechar y sembrar del establecimiento. Imágenes tomadas en visita.

2.2. Soluciones comerciales actuales

En Uruguay hay empresas como INDATA [17], SENSORDATA [18] y TeLIOT [19], entre otras, que facilitan instrumentos para la lectura de variables claves en los procesos productivos de la agroindustria, así como el diseño y desarrollo de redes LoRaWAN.



Figura 5: Sensor de PH:
INDATA[17].



Figura 6: Sensor de nutrientes del suelo
(Nitrógeno, potasio, fósforo): INDATA [17].

Los dispositivos que actualmente se comercializan en tecnología LoRa por estas empresas son:

- Sensor de PH del suelo.
- Sensor de humedad, temperatura y conductividad del suelo.
- Sensor de humedad y temperatura en hojas y ambientales.
- Sensor de nutrientes como el nitrógeno, fósforo y potasio.
- Sensores ultrasónicos de distancia, para líquidos y piezas móviles.
- Controladores remotos de entradas y salidas.
- Sensores de apertura de puertas y detección de intrusos.

- Sensores de fugas de agua.
- Localizadores GPS de maquinaria y animales.
- Control a distancia de consumo de combustible por hectárea, trackeo de maquinaria y registro de áreas cosechadas/sembradas/fumigadas.
- Control de velocidad de maquinaria.

Adicionalmente se realizó una visita en la pasada Expo Feria de la Rural del Prado para entender un poco más sobre las propuestas tecnológicas a las problemáticas vistas en el capítulo 2.1. En la misma, se observó una total ausencia de propuestas con tecnologías de información con dispositivos de comunicación de largo alcance como presenta LoRa. En particular, no se observó ninguna propuesta para la producción agrícola, de tecnologías inalámbricas de ningún tipo.

En cuanto a propuestas de otras tecnologías enfocadas a la ganadería, se observaron propuestas sobre collares RFID para la identificación de animales en la industria lechera, con detección de celo, estado sanitario, temperatura y movimiento.

Este es el caso de la empresa multinacional GEA Engineering.



Figura 7: Collar RFID de la empresa GEA.
Imágenes tomadas en visita a expo prado
2022.

En conversación con técnicos de esta empresa GEA Engineering⁸, se observó que no hay conocimiento claro de su funcionamiento técnico. Sin embargo, comentan que los collares RFID con solo un identificador del vacuno, ronda los USD 200 y solo sirven para identificar al animal al momento de ordeñarlo, donde luego existe un proceso automático de tratamiento de la leche y se determina si el animal puede estar enfermo mediante el control de temperatura y monitoreo diario del volumen de leche ordeñada.

Presentan una segunda opción de collar, el cual monitorea a distancia el comportamiento del animal para indicadores de sanidad, celo y geolocalización. No se obtiene información sobre su funcionamiento, dado que no es una propuesta comercializada por el momento en Uruguay. Se entiende que depende de señales de telefonía celular y/o almacena información hasta estar en cercanías del sistema de ordeño que toma la información de forma inalámbrica.



Figura 8: Detectores de celo y avisadores de parto de marca LiderGlobal. Imágen tomada en visita de Expo Prado 2022.

⁸ <https://www.gea.com/>

Otra opción fue la de la empresa LiderGlobal con una propuesta de detectores de celo y avisadores de parto de marca Moocall de origen irlandés.

Esta propuesta, contempla el seguimiento del celo y la monta, lo cual posibilita mayor independencia del productor al seguimiento de vacas próximas a parir y a la detección adecuada para posibles inseminaciones artificiales que sean necesarias para no perder el período. A pesar de contar con una valiosa propuesta para problemas reales de la producción ganadera y de lechería, esta tecnología utiliza señales de celular para comunicación vía SMS o en su defecto, conectividad WIFI.

Esto puede no ser adecuado en muchos establecimientos e implican un costo mensual para su funcionamiento. Comentan que su costo ronda los USD 450 en el caso del detector de parto (El más pequeño) y USD 2900 el collar de detección de celo. Entienden que este costo es sumamente razonable para la efectividad y ahorro que tiene su uso, pero comentan que es una dificultad para el productor disponer de este capital para estas nuevas tecnologías.

La tecnología no parece ser muy diferente, al menos en el hardware necesario, al trabajo desarrollado en la UCU para detección de celo [4].

En cuanto a proveedores extranjeros de instrumentos de este tipo, se observan los siguientes, entre otra gran cantidad de empresas que ofrecen sus equipos tanto en Aliexpress⁹ como en Alibaba¹⁰:

- Altronics¹¹ (Chile): Comercializa productos de la marca Dragino, con sensores desde los USD 37 a los USD 130.
- Milesight¹² (China): Reconocido proveedor de sensores y Gateways de marca propia. Con Gateways entre USD 450 y USD 1500 y sensores desde USD 50 a USD 300.

⁹

https://es.aliexpress.com/wholesale?catId=0&initiative_id=SB_20221012213625&SearchText=agriculture+lorawan+sensors&spm=a2g0o.productlist.1000002.0

¹⁰

https://spanish.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&tab=all&SearchText=agriculture+lora+sensors&viewtype=

¹¹ <https://altronics.cl/index.php?route=product/search&search=lora&page=3>

¹² <https://www.milesight-iot.com/lorawan/gateway/ug67/>

- MocoSmart¹³ (China): Proveedor de dispositivos LoraWan, con sensores desde USD 38 a USD 50. Y Gateways entre USD 270 y USD 450.
- Four-Faith¹⁴ (China): Proveedor de equipamiento LoraWan de marca propia, con Gateways entre USD 450 y USD 800.

2.3. Estudios actuales de soluciones

Para el conocimiento de estudios actuales en el desarrollo de aplicaciones IoT para la agroindustria, se participó en un Webinar IoT el pasado mes de diciembre de 2021 organizado por universidades de Uruguay, Argentina y España, apoyados por el proyecto NEON.

En el mismo, se destacaron las principales virtudes de las distintas tecnologías inalámbricas aplicables a IOT, estudios actuales de soluciones en cada región y posibles necesidades futuras.

En particular, los dispositivos en estudio presentados de mayor interés para la agroindustria fueron los siguientes:

- **Sensores para detección de heladas**, con análisis predictivo para protección de producción cítrica, UDELAR [20]. Utiliza la especificación IEEE 802.15.4/6LowPAN, pero podría realizarse un estudio para aplicarlo mediante LoRaWAN. Monitorea temperatura y humedad, tanto del ambiente como del suelo.
- **Sistema de detección de plagas**, basado en la captura de insectos en sustrato con feromonas y toma de imagen para el conteo de insectos. Este método logra atrapar los insectos macho para evitar la reproducción. En caso



Figura 9: Sensor para detector de heladas [20].

¹³ <https://www.mokosmart.com/es/>

¹⁴ <https://www.fourfaith.com/>

de evidenciar un número excesivo de insectos, se puede considerar ineficiente el método y tomar la decisión de fumigar.

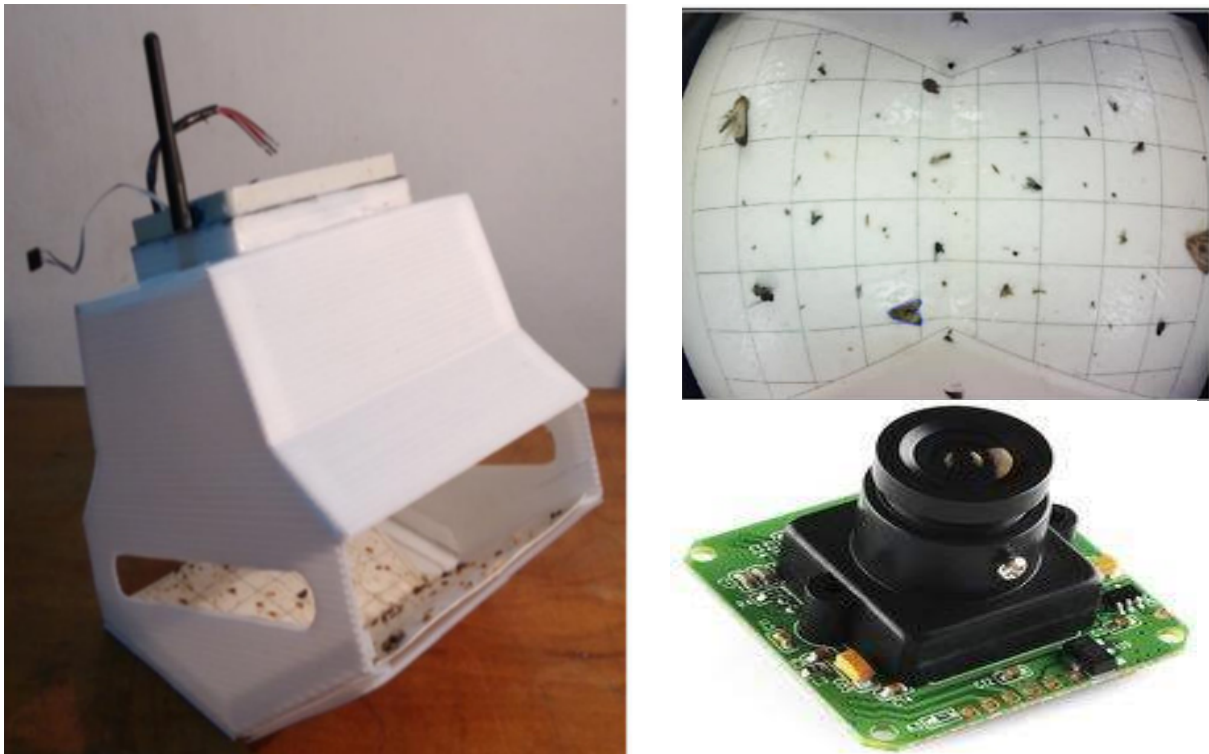


Figura 10: Dispositivo desarrollado por UDELAR para gestión de plagas en la agroindustria [20].

El dispositivo cuenta con una cámara de fotos (LinkSprite LS-Y201-2MP) y es alimentado por tres pilas AA. En principio, se programó para enviar una imagen comprimida cada 12 hs, donde destina un ciclo de envío de 50 min y en caso de no lograr el envío de la imagen en ese ciclo, retoma en otro los datos faltantes. Fue posible el envío de paquetes IP con un MTU (Maximum transmission unit) de 1280 Bytes aplicando mecanismos de compresión de los encabezados y fragmentación de la información [20].

Adicionalmente, existen dispositivos como los Dendrómetros para la medida de diámetros de árboles y los sensores de flujo de savia que observan la calidad de irrigación y proporcionan la posibilidad de predecir el crecimiento del árbol:



Figura 11: Dendrómetro para lectura de diámetro del árbol [21].



Figura 12: Medidor de flujo de savia [22].

Ambos instrumentos no son comercializados en Uruguay, pero podrían ser de utilidad en los predios forestales.

2.4. Modelo adecuado a la agroindustria

El relevamiento de las necesidades de la agroindustria, estatus del mercado y casos en estudio vistos en los pasados capítulos 2.1, 2.2 y 2.3 son la información que se toma en cuenta para este modelo.

Tomaremos como primera condición, el uso de un único Gateway para la red. Teniendo en cuenta además que los nodos trabajan en su menor medida a 5 km de distancia del Gateway y que habitualmente tendremos energía eléctrica solo en un extremo del campo (casco de estancia) limitaremos el área de trabajo a **1000 Has**. Los establecimientos analizados hasta el momento se pueden calificar de cuatro tipos básicos (Luego pueden existir combinaciones de ellos).

1. Ganadero
2. Lechero
3. Agrícola
4. Forestal

El número de dispositivos necesarios podría ser el siguiente:

Ganadero:

- En cuanto a los campos de ganado vacuno, pueden existir 3 vacunos cada 2 Has. Esto implicaría 1.500 dispositivos.
- Respecto al control natal, sería interesante el uso de dispositivos en los toros para el control de monta. Contemplando que la tasa habitual es de 1 toro cada 30 vacas, se contemplarán 50 dispositivos adicionales.
- En cuanto a los campos de ganado ovino, serían 30 por cada hectárea, lo cual significa 30.000 dispositivos. Bajo las limitaciones del uso de un único Gateway, se consideraría un establecimiento con solo 1500 ejemplares, entendiendo además que no sería un costo razonable ni necesario abarcar a todos los ovinos.
- Para el control de funcionamiento y correcta instalación de alambrados, se contemplarán al menos 28 nodos separados 500 m entre sí en todo el perímetro del campo.
- Para la vigilancia en puntos estratégicos, se consideran 10 cámaras con captura de imagen ante eventos.

Lechero:

- Por motivos logísticos, los establecimientos lecheros no cuentan con gran cantidad de animales. Según INIA, un establecimiento promedio en Uruguay cuenta con 150 animales [23]. Por lo tanto, consideraremos 150 dispositivos de control sanitario.
- Es necesario para estos establecimientos, el control natal para mantener la productividad de leche. 100 dispositivos para el control de celo y otros 50 para el aviso de parto serían necesarios.
- Aplica en el mismo sentido que un campo ganadero, 28 nodos para el control de alambrados y eventualmente, 10 cámaras para control de vigilancia.

Agrícola:

- En campos de producción agrícola, se podría asumir un dispositivo de lectura de Temperatura y humedad por cada 10 hectáreas en producciones intensivas, lo que sería equivalente a 100 dispositivos.
- Si fuera necesario el uso de sensores fotocromáticos para la detección de cambio de color en las hojas, podría ser necesario colocar uno cada 10 hectáreas, contabilizando 100 dispositivos.
- El control de PH y nutrientes, un sensor cada 100 has sería suficiente, contemplado por 10 dispositivos en total.
- Respecto a la necesidad de diagnosticar plagas precozmente con el uso de cámaras, podría ser adecuado colocar una cámara cada 100 Has, siendo 10 dispositivos de este tipo los necesarios.

Forestal:

- En campos forestales, el comportamiento es muy similar al de la detección de plagas, lo que equivaldría a 10 dispositivos de control de flujo de savia y otros 10 Dendrómetros.
- Sería importante el control de humedad en el suelo, por lo que un sensor cada 10 Has es recomendado, contabilizando 100 dispositivos instalados.

En resumen, sumando 10 dispositivos para uso general a cada línea de negocio, el número total sería:

Agronegocio/Dispositivo	De tipo general	De tipo especial
Ganadero	1538	60
Lechero	288	60
Agrícola	220	10
Forestal	120	0

Tabla 2: Número de dispositivos por agronegocio. "General": Temperatura, humedad, GPS, etc. "Especial": Cámaras fotográficas, acelerómetro.

En cuanto al tipo de nodos, pueden clasificarse según sus requerimientos:

#	Variable de detección	Frecuencia de transmisión	Carga de datos en el mensaje	Consumo de batería de sensores
a	Temperatura, Humedad, Presión, fuga de agua.	BAJA (máximo cada cuatro horas)	BAJA (3 Byte)	MEDIO (Varios sensores)
b	Apertura de puerta, control velocidad de maquinaria.	ALTA (Cada 30 min o alarmas)	BAJA (1 Byte)	BAJO (lectura de 1 bit)
c	Distancia	ALTA (Cada 30 min o alarmas)	BAJA (1 Byte)	ALTO (Inducción ultrasónica/ Láser)
d	PH, Nutrientes	BAJA (Cada 8 hs)	BAJA (1 Byte)	MEDIO (Análisis eléctrico)
e	GPS	ALTA (Cada 1 hora o a demanda)	BAJA (4 Bytes)	MEDIO (Geolocalización satelital)
f	Collar de sanidad, celo y localización de animales.	BAJA (Cada 6 horas, ante alarmas o a demanda)	MEDIA (12 Bytes)	ALTO (Geolocalización, acelerómetro)
g	Sensor de flujo de savia	BAJA (Cada 8 hs)	BAJA (1 Byte)	MEDIO (Medición)
h	Dendrómetro	BAJA (Cada 2 días máx)	BAJA (1 Byte)	MEDIO (Motor y encoder)
i	Imagen	BAJA (Cada 12 hs)	ALTA (1200 Bytes, 19 msg)	ALTO (Cámara y transferencia)
j	Detector de parto	ALTA (Cada 1 hora o alarmas)	BAJA (1 Byte)	ALTO (Acelerómetro)

Tabla 3: Análisis cualitativo de dispositivos necesarios para el modelado.

Podemos clasificarlos según las necesidades de cada uno como:

A- Los de alta frecuencia de transmisión.

B- Los de alta carga de datos.

C- Los de alto consumo de energía.

Por lo cual, según los tipos de agronegocios vistos, aplica modelar según el tipo de sensores que son utilizados en cada uno de ellos:

Agronegocio/ Necesidad	A (Frecuencia)	B (Transmisión)	C (Energía)
1- Ganadero	SI	SI	SI
2- Lechero	SI	SI	SI
3- Agrícola	NO	SI	SI
4- Forestal	NO	NO	SI

Tabla 4: Análisis de características de dispositivos según agronegocio.

Por lo visto en los puntos anteriores, en todos los casos es necesario analizar el consumo de energía.

Para el caso de los negocios ganaderos, se observa la necesidad de una gran frecuencia de transmisión. El uso de cámaras de vigilancia, implicaría contemplar grandes transmisiones de datos mientras un gran número de nodos están transmitiendo en simultáneo.

Respecto al negocio agrícola, se requiere una baja frecuencia de mensajes por ser un proceso lento, pero el utilizar cámaras para el envío de imágenes requiere un estudio de transferencias con gran cantidad de información.

Para el caso de los negocios forestales, solo es necesario observar el consumo de energía.

Podemos resumir entonces, que es posible realizar el estudio bajo tres modelos de red de datos:

1- Modelo ganadero

2- Modelo agrícola

3- Modelo forestal

CAPÍTULO 3

Requerimientos del proyecto

3.1. Consumo de batería

En los tres modelos vistos en el capítulo 2, es necesario evaluar el consumo de energía.

Según lo visto en la *Tabla 2* sobre el tipo de dispositivos a utilizar, los de mayor consumo resultan ser:

Sensor	Consumo (mA)
Acelerómetro	55
GPS	36
Cámara	100
Sensor de distancia ultrasónico	12
Sensor de distancia láser	38
Sensor fotocromático	13

Tabla 5: Consumo de sensores, datos tomados de hojas de datos de equipos promedio.

Respecto a los controladores y transmisores:

Dispositivo	Consumo (mA)
Controlador activo	10
Controlador en Sleep	0.01
Transmisor activo	110
Transmisor en Sleep	0.03

Tabla 6: Consumo de controladores y transmisores, datos tomados de hojas de datos de equipos promedio.

Considerando los nodos del modelo planteado de la *Tabla 2* los de mayor consumo serían:

#	Dispositivo	Sensores	Consumo en transmisión (Itx[mA])	Frecuencia diaria (msg/día)
c	Distancia	Ultrasónico	132	48
f	Collar de sanidad y localización de animales. Dispositivo de celo.	Acelerómetro, GPS, Temperatura	212	4
i	Imágen	Cámara	220	2
j	Detector de parto	Acelerómetro, GPS, Temperatura	212	24

Tabla 7: Dispositivos de mayor consumo.

El objetivo en cuanto al consumo de energía siempre será contar con la mayor duración posible, pero siendo coherentes con el tamaño y el costo final del nodo. Se considera que los dispositivos de mayor consumo sean desarrollados con baterías de 3.7vdc recargables y con capacidad necesaria para que los períodos de carga sean razonables. Se contempla en los dispositivos de menor consumo de energía, el uso de tres pilas AA recargables de 1000 mAH.

Como requerimiento en este sentido, se observa la necesidad de asegurar no tener que recargar baterías a menos de seis meses.

3.2. Alcance de comunicación

Bajo el modelo presentado en el capítulo 2.4, el establecimiento considerado es de 1000 Has. Lo cual corresponde a un campo de 10 Km² tal como se observa en la siguiente figura.

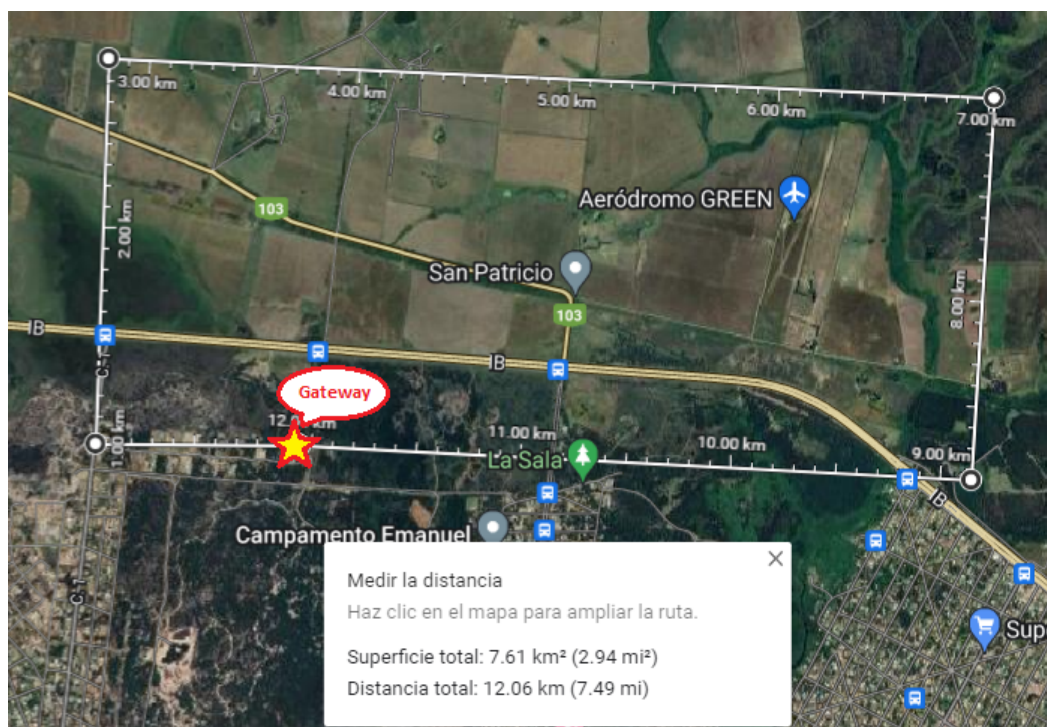


Figura 13: Establecimiento de 1000Has en balneario Guazuvirá, Canelones, Uruguay. Imagen satelital tomada mediante Google Maps.

Por lo cual, el modelo requiere un alcance mínimo de 4 km.

3.3. Eficacia de transmisión

Dado que el modelo se basa en un establecimiento rural, es de esperar que las características geográficas del terreno y la baja frecuencia de transmisión propicien un alto nivel de eficacia de transmisión (Relación entre los mensajes enviados y los efectivamente recibidos). Un estudio reciente en la ciudad de Santander, obtuvo en

condiciones urbanas una tasa de eficacia superior al 96% con equipamiento similar al considerado para este proyecto [24], pero con un único nodo.

Las pruebas a considerar en este sentido, deberán observar el comportamiento de la red bajo señales de larga distancia y a numerosos dispositivos enviando información en simultáneo. Se espera entonces, que la eficacia de transmisión para todas las pruebas supere el 96%.

$$Eficacia\ de\ transmisión = \frac{Paquetes\ Recibidos}{Paquetes\ enviados} * 100$$

3.4. Actualización remotas

Para el desarrollo de una red de estas características, es muy valioso contar con la posibilidad de tomar acciones técnicas o realizar mejoras de forma remota a los nodos desplegados. Esto proporciona agilidad al proceso y practicidad, tanto para el técnico ejecutante como para el propietario de la red.

Se toma como requisito la posibilidad de actualizar de forma remota el firmware de los dispositivos. Se entiende que el gran obstáculo es la capacidad máxima permitida de datos a transferir por la banda ISM y la duración de la batería, la cual se verá afectada en cada evento de actualización.

3.5. Multiplicidad de nodos

Los mayores fabricantes de Gateways para esta tecnología, afirman que estos equipos tienen la posibilidad de conectarse y mantener activa una red con miles de dispositivos finales.

Según el modelo de red previsto en el capítulo 2.4, un establecimiento ganadero sería el que debe considerar una mayor cantidad de dispositivos. Se toma como requerimiento la posibilidad de conectar al menos 1500 dispositivos para este proyecto.

CAPÍTULO 4

LoRa

4.1. Sistemas IoT

Las redes LoRa son una de las soluciones que integran lo que se conoce como LPWAN, y permiten efectivamente conectar sensores a Internet (IoT). Tal como se menciona en [25] un sistema de IoT cuenta con las siguientes características:

- Es una interconexión de “cosas”, siendo dichas cosas cualquier objeto físico que sea relevante desde la perspectiva del usuario o para una aplicación.
- Es una conexión de “cosas” a internet,.
- Los componentes de los sistemas IoT son únicos y se pueden identificar.
- Las redes IoT deben estar disponibles cuando y donde se necesiten según la definición de ITU (International Telecommunication Union).
- En los sistemas IoT se involucran también sensores, actuadores, u otro tipo de dispositivos que se conectan a las “cosas” y al actuar las transforman en inteligentes.
- Los sistemas IoT tienen una capacidad de comunicación basada en estándares y protocolos de interoperabilidad.
- La autoconfiguración es otra característica de estos sistemas, ya sea en términos de software o en el manejo de recursos como pueden ser la energía, el ancho de banda de comunicación, el acceso al medio, entre otros.

- Los dispositivos presentes en las redes IoT además son programables, es decir que su comportamiento puede ser determinado por un usuario mediante comandos sin necesidad de cambios físicos.

El alcance de un sistema IoT varía de un sistema pequeño que contiene únicamente objetos identificables y pequeños sensores a un sistema que interconecta millones de cosas con la capacidad de proveer servicios complejos, en el caso del proyecto utilizamos un sistema pequeño pensado como modelo a escala para un sistema más grande teniendo en cuenta que todo lo investigado debe ser fácilmente replicable para que el funcionamiento de la red siga siendo posible aún con miles de dispositivos.

En resumen, un sistema IoT como el que se podría implementar en la agricultura realmente, es una red compleja con la capacidad de auto configurarse y que interconecta los distintos dispositivos a internet a través del uso de un protocolo de comunicación estándar. Los dispositivos son únicos e identificables, pueden tener tanto la capacidad de sensor como de actuar y además son programables y ofrecen servicios que pueden requerir o no de la intervención humana. Para aprovechar mejor estos servicios que se pueden brindar a través de los dispositivos se pueden utilizar interfaces inteligentes que hacen que estén disponibles en cualquier momento, en cualquier lado y con distintos propósitos.

Una vez definidos los sistemas IoT se puede decir que este tipo de soluciones son importantes hoy en día en zonas donde la conectividad a internet y el acceso a la energía eléctrica es restringido. LoRa, como mencionamos anteriormente, es una de las tecnologías que integra el conjunto de soluciones IoT, la misma, por la forma de procesar las señales, presenta como particularidad un gran alcance ya que permite comunicar dispositivos hasta 20 km con un bajo consumo de energía en los nodos, es por esto que fue la tecnología elegida para llevar a cabo este proyecto. En los siguientes incisos profundizaremos sobre esta tecnología.

4.2. LoRa

Empezaremos definiendo que es LoRa (abreviación de “Long Range”, largo alcance en español), para ello consultamos la página de Semtech [26] la empresa que introdujo este sistema. LoRa es una técnica de modulación de dispersión del espectro que deriva de la tecnología de modulación chirp, la cuál consiste en usar todo el ancho de banda disponible para enviar una señal haciéndola más robusta frente a los ruidos en el canal. A su vez, sobre esta técnica se ha desarrollado un protocolo de red, en configuración tipo estrella, LoRaWAN, que permite conectar miles de nodos contra un solo Gateway. Las principales características de LoRa son:

- La descripción de LoRa y LoRaWAN es independiente de la banda de frecuencia pero habitualmente se utiliza las bandas ISM de 433MHz, y 915MHz (o similar según la región).
- Es un tipo de modulación muy robusta a la interferencia, y al esparcir el espectro los receptores alcanzan una sensibilidad del orden de -130dBm. (150dB para el enlace con un transmisor a 20dBm).
- Por este motivo se alcanzan distancias de transmisión en línea de vista por encima de 10 kilómetros en forma confiable.
- LoRa y LoRaWAN están previstos para una baja tasa de transmisión de datos, por ejemplo, el máximo paquete previsto es de 256 Bytes.
- No existen restricciones para desplegar una red LoRa propietaria, no se debe pagar ningún tipo de licencia por la utilización del protocolo (a diferencia de SigFox o RPMA por ejemplo).

Siendo de uso libre, LoRa se ha convertido en una de las plataformas más populares para implementar IoT a grandes distancias. Las redes y dispositivos LoRa como puede ser LoRaWAN, un tipo de redes del que hablaremos más adelante, permiten que las aplicaciones inteligentes de IoT resuelvan problemas del mundo actual como el manejo de energía, la reducción de recursos naturales, el control de la polución, la eficiencia de la infraestructura y la prevención de desastres. Es por esto que LoRa se utiliza en distintas aplicaciones en ciudades inteligentes, cadenas

de provisión y logística, hogares y agricultura entre otros, llegando a los cientos de millones de dispositivos conectados en más de 100 países.

Una red LoRa está formada por:

- Dispositivos: Los mismos incluyen los transceptores configurados con dispositivos LoRa y embebidos en nodos finales o sensores con una aplicación determinada; y los gateways que son quienes reciben la información que los sensores envían, estos pueden estar en el interior o el exterior y en general no consumen mucha energía.
- Los servidores de red a quienes los gateway le envían la información por Wi-Fi, ethernet o celular, estos son los encargados de ejecutar las funciones de gestión de la red como activar la transmisión inalámbrica, el control de la optimización de la tasa de transmisión de información y la gestión de tráfico, entre otros.
- Aplicaciones y servicios IoT en la nube que interpretan la información y permiten utilizarla para resolver problemas.

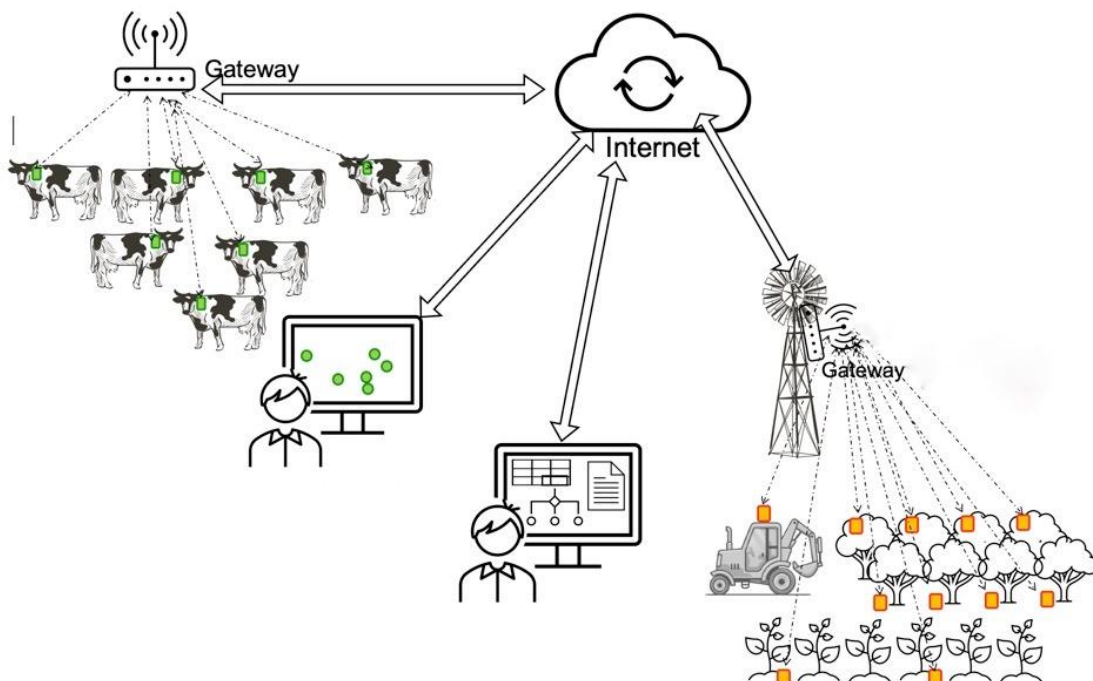


Figura 14: posible modelo de red LoRa aplicado en la agroindustria.

A pesar de que algunos usuarios implementan LoRA con una red propietaria (punto a punto a un nodo central) es muy común el uso de LoRaWAN, un estándar para la interoperabilidad que resuelve la mayoría de los casos de uso en el ecosistema de LoRa. Este estándar es manejado por la LoRa Alliance [27], una asociación abierta sin fines de lucro. Los miembros de esta asociación colaboran para llevar a que el estándar LoRaWAN sea uno de los líderes en el mundo en materia de conectividad IoT LPWAN, es decir conexiones IoT con bajo consumo de energía y amplio rango de cobertura. Las conexiones LoRaWAN tienen como particularidad la flexibilidad para ser utilizadas en un amplio rango de aplicaciones IoT ya sean estáticas o móviles garantizando la interoperabilidad. Dado que es este el estándar a utilizar en este proyecto desarrollaremos un poco más en el siguiente inciso, pero antes mencionaremos algunas características de las redes LoRa que nos parece importante tener en cuenta a la hora de pensar el proyecto.

4.2.1. Frecuencias de LoRa

LoRaWAN opera en la banda ISM¹⁵ (Industrial, Scientific, and Medical, en español Industrial, Científica y Médica) sin licencia. El plan de frecuencia en el que puede operar la red depende de la región en la que se encuentre, tal como muestra la siguiente tabla, extraída de la página de The Things Network [28].

Channel Plan	Common Name	Country
EU863-870	EU868	Europa
US902-928	US915	Estados Unidos
CN779-787	CN779	China
EU433	EU433	Europa

¹⁵ ISM: Industrial, Scientific & medical, Bandas de frecuencia de uso libre.

AU915-928	AU915	Australia
CN470-510	CN470	China
AS923	AS923	Asia
KR920-923	KR920	South Korea
IN865-867	IN865	India

Tabla 8: planes de frecuencia más usados para LoRa, el nombre con el que se las conoce y la región con la que se las identifica.

4.2.2. Spreading Factor

LoRa se basa en la modulación chirp. El spreading factor controla la tasa de transmisión de los chirps, que son quienes contienen la información. Un spreading factor más bajo implica que los chirps vayan más rápido y por lo tanto que la tasa de transmisión de datos sea mayor. Cada vez que aumentamos el valor del spreading factor el barrido de los chirps se reduce a la mitad así como la tasa de transmisión de información.

Un valor de spreading factor más bajo también implica una reducción en el rango de transmisión de LoRa y que se reduce la ganancia en el procesamiento y se aumenta la tasa de bits, es decir, cambiar el spreading factor permite que la red aumente o disminuya la tasa de datos para cada dispositivo final a expensas del rango.

El spreading factor también se usa para controlar la congestión en la red ya que señales moduladas con distinto spreading factor y transmitidas en el mismo canal de frecuencia al mismo tiempo no interfieren unas con otras.

La modulación en LoRa tiene un total de 6 spreading factors que van desde el SF7 al SF12, los mismos influyen en la cantidad de chirps, el límite de SNR (relación

señal ruido), el tiempo en el aire del paquete, la tasa de transmisión de datos, la duración de la batería y la sensibilidad del receptor [29].

En la tabla a continuación podemos ver los valores que toman algunas de estas variables para los distintos valores Spreading Factor con un ancho de banda de 125 kHz.

LoRa Spreading Factors (125kHz bw)

Spreading Factor	Chips/symbol	SNR limit	Time-on-air (10 byte packet)	Bitrate
7	128	-7.5	56 ms	5469 bps
8	256	-10	103 ms	3125 bps
9	512	-12.5	205 ms	1758 bps
10	1024	-15	371 ms	977 bps
11	2048	-17.5	741 ms	537 bps
12	4096	-20	1483 ms	293 bps

Tabla 9: valores de cantidad de chirps, el límite de SNR (relación señal ruido), el tiempo en el aire del paquete y la tasa de transmisión de datos para los 6 valores de Spreading Factor posibles [30].

4.3. LoRaWAN

Como veníamos diciendo, LoRaWAN es un protocolo de red de bajo consumo y amplio rango de cobertura, es decir LPWA (Long Power, Wide Area) diseñado para conectar dispositivos operados a batería a internet ya sea en redes regionales, nacionales o globales. Además cumple con requerimientos claves de IoT como la comunicación bidireccional, la seguridad punto a punto, la movilidad y los servicios de ubicación. A continuación mencionaremos algunas características de LoRaWAN basándonos en la información que provee la LoRa Alliance en su sitio web [31].

4.3.1. Topología

La arquitectura de una red LoRaWAN se despliega en una topología de estrella dentro de otra estrella, es decir, los nodos se conectan contra el gateway y los gateways a su vez contra el servidor central de la red. El gateway se conecta contra el servidor vía IP, por lo que actúa como puente convirtiendo los paquetes RD en paquetes IP y viceversa. A su vez los nodos se conectan de manera inalámbrica al gateway usando la capa física de LoRa, aprovechando el amplio rango que esta permite un solo salto en la comunicación entre el dispositivo final y uno de los gateways. Todos los modos son capaces de comunicarse bidireccionalmente, y se podrían enviar mensajes de multicast a determinados grupos para usar el espectro de forma más eficiente por ejemplo a la hora de actualizar el firmware.

LoRaWAN permite la interoperabilidad entre diferentes proveedores de equipos y aunque define como debe ser la implementación técnica no define un modelo comercial o un tipo de despliegue por lo que ofrece libertad de uso.

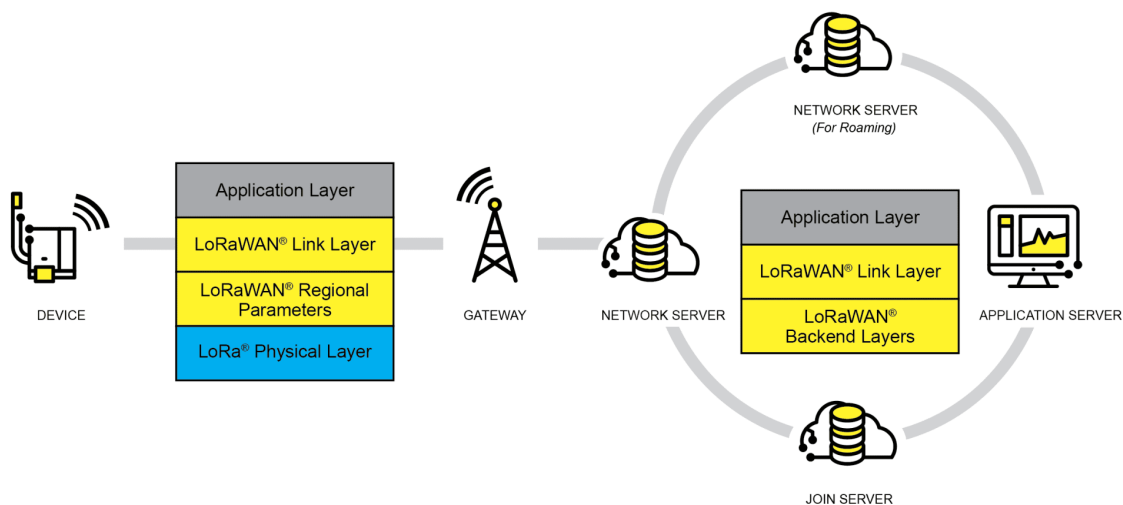


Figura 15: Topología de la red LoRa con LoRaWAN [31].

4.3.2. Clases de dispositivos finales

Clase A - Bajo consumo, dispositivos finales bidireccionales: Esta es la clase por defecto que todos los dispositivos finales de LoRaWAN deben soportar. La comunicación en clase A siempre es iniciada por el dispositivo final y es asíncrona,

la transmisión del nodo al gateway se puede mandar en cualquier momento y luego se dejan dos ventanas de espera de mensajes para que se pueda establecer la comunicación bidireccional o un comando de control por parte de la red en caso de ser necesario.

El dispositivo puede entrar en modo sleep de bajo consumo cuando sea necesario y según se le defina dependiendo de la aplicación para la que se usa, no hay ningún requerimiento por parte de la red de períodos en los que tenga que estar funcionando, es por esto que esta clase de nodos son los que operan con el consumo de energía más bajo permitiendo de todas maneras la comunicación en todo momento.

Dado que la comunicación del gateway al dispositivo final debe ocurrir siempre luego de que el nodo final se comunica con el gateway, toda información que se quiera mandar al mismo debe ser guardada en el buffer del servidor de la red hasta que se establezca la comunicación.

Clase B - Dispositivos finales bidireccionales con latencia de bajada determinada: Los dispositivos finales de clase B, además de las ventanas de recepción que manejan los clase A luego de enviar un mensaje, se sincronizan con la red y abren “ping slots” de descarga en espacios de tiempo programados. Esto le da la posibilidad a la red de enviar mensajes al dispositivo final con una latencia determinada pero conlleva un consumo de energía mayor en el dispositivo final, aunque sigue siendo lo suficientemente bajo como para que el dispositivo pueda funcionar a batería. La latencia puede ser de hasta 128 segundos y es programable para satisfacer las diferentes necesidades de la red en función de la aplicación para la que se use.

Clase C - Baja latencia, dispositivos finales bidireccionales: Los dispositivos finales clase C tienen la recepción de mensajes habilitada en todo momento, mientras que no estén transmitiendo, por lo que el servidor de la red puede enviarles un mensaje en cualquier momento. Este tipo de nodo es útil únicamente para aplicaciones donde hay disponibles fuentes de energía continuas ya que el consumo en el dispositivo final es más elevado. De todas formas, en caso de no tener disponible

una fuente de energía continua existe la posibilidad de cambiar entre clase A y clase C dependiendo de las necesidades en cada momento.

4.3.3. Tasa de transmisión de información

Además de los saltos de frecuencia, los paquetes de comunicación entre los dispositivos finales y los gateways incluyen un tasa de transmisión de datos variable (DR, del inglés Data Rate) y configurable. La DR permite una negociación dinámica entre el rango de comunicación y la duración del mensaje. Además, debido a la tecnología de dispersión en el espectro, las comunicaciones con diferentes DR no interfieren entre ellas y crean un conjunto de canales virtuales aumentando así la capacidad del gateway. Para maximizar tanto la batería de los dispositivos finales como la capacidad general de la red, los servidores de las redes LoRaWAN manejan los ajustes de configuración de la DR y la energía de salida de RF para cada uno de los dispositivos finales de forma individual, para ello se basa en un esquema de tasa de transmisión de datos adaptada (ADR, del inglés Adaptive Data Rate).

El rango de la tasa de transmisión de LoRaWAN va desde 0.3 kbps a 50 kbps.

4.3.4. Seguridad

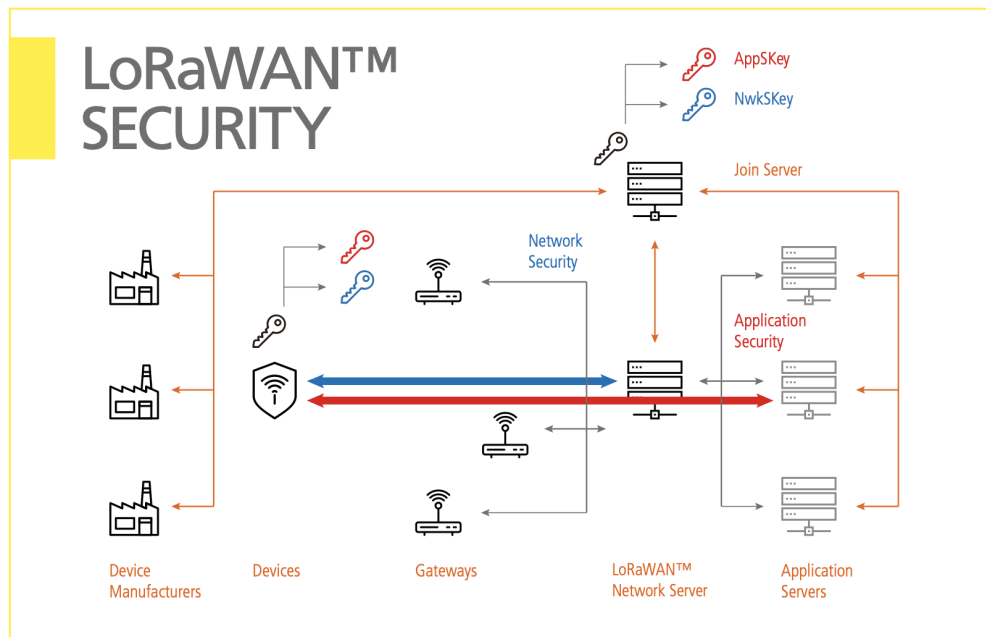


Figura 16: esquema de funcionamiento de la seguridad en LoRaWAN [32].

La seguridad es importante en cualquier despliegue IoT, en particular la especificación LoRaWAN define dos capas de criptografía:

1. Una clave de Sesión de Red única de 128 bits que se comparte entre el dispositivo final y el servidor de la red.
2. Una clave única de Sesión de Aplicación de 128 bits compartida entre puntos finales a nivel de aplicación.

Se utilizan algoritmos AES (Advanced Encryption Standard) para proveer la autenticación y la integridad de los paquetes al servidor de la red, así como para la comunicación encriptada entre puntos finales para el servidor de aplicación. Estos dos niveles de seguridad hacen posible que se implementen las redes compartidas con múltiples usuarios sin que el operador de la red pueda ver la carga de datos enviada por los usuarios.

Estas claves se pueden activar por personalización en la línea de producción o en la puesta en marcha de la red, así como de forma inalámbrica una vez que la red está funcionando en lo que se conoce como Over-The-Air Activated (OTAA, en español

activación a través del aire). Esta última forma de activación permite cambiar la clave a los dispositivos en caso de ser necesario.

CAPÍTULO 5

Normativa

5.1. Internacional

El principal aspecto a estudiar a la hora de evaluar la normativa respecto a LoRaWAN son los parámetros regionales establecidos para su funcionamiento como se explica en la página de The Things Network [28], de ahí se extrae la información que se expone a continuación. LoRaWAN opera de forma similar al WiFi, en un espectro de radio sin licencia, lo que implica que cualquiera puede usar las frecuencias de radio sin pagar por los derechos de transmisión. Cualquiera puede instalar un gateway y enviar señales de LoRa sin la necesidad de una licencia o un permiso.

Al usar frecuencias de radio con un alcance mayor surge como requerimiento establecer ciertas restricciones, que además suelen ser propias de cada país. Esto último va en contra de la búsqueda de uniformidad en todas las regiones del mundo que propone LoRaWAN. Es por esto que surgen las distintas bandas de frecuencias por región mencionadas en el capítulo 4. A pesar de que todas las bandas soportan un mismo protocolo sin importar la región, hay ciertas restricciones a la hora de implementar los sistemas:

- Hay especificaciones regionales oficiales para LoRaWAN que están definidas en el sitio de la LoRa Alliance [33]. De todas formas estos parámetros

regionales no abarcan todo lo que implica LoRaWAN, un ejemplo de esto es Asia, región para la cual los parámetros regionales solo especifican un subset de canales pero luego hay variaciones entre los distintos países de Asia. Además cada operador de los servidores de red puede seleccionar parámetros adicionales como la emisión de canales.

- En algunos países se puede utilizar más de un plan de frecuencias, como puede ser Holanda donde se pueden usar tanto el EU868-870 como el EU433.
- Los parámetros regionales incluyen tanto parámetros de la capa física como los planes de frecuencia, las tasas de datos y frecuencia de canales obligatorios para los mensajes de pedido de unión a la red; como parámetros de la capa de LoRaWAN como el tamaño máximo de los paquetes.

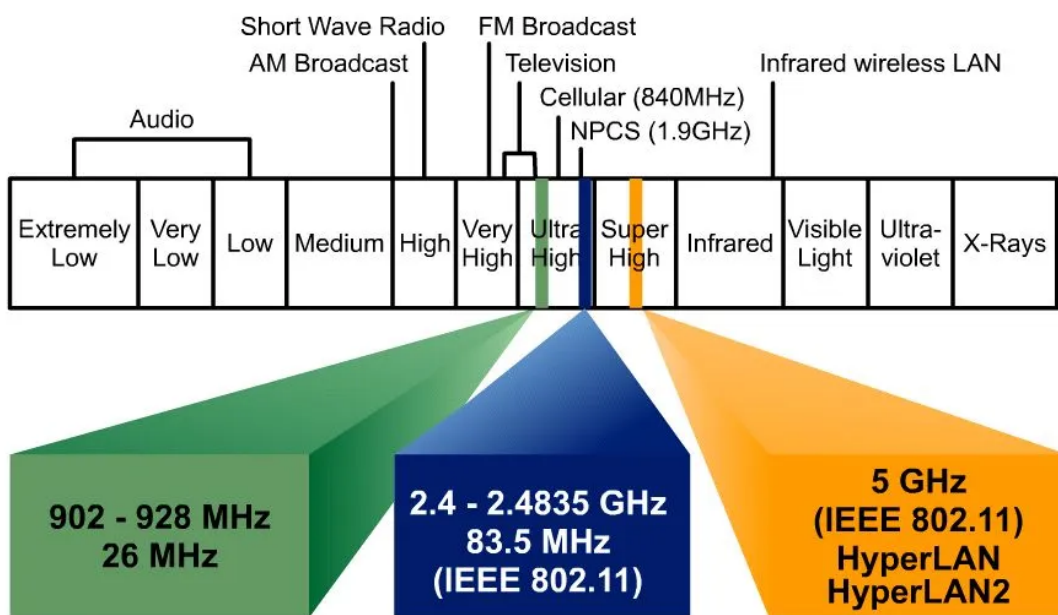


Figura 17: Bandas libres para aplicaciones ISM [34].

5.2. En Uruguay

Uruguay pertenece a la región en la que se recomienda el uso de el plan de frecuencia US902-928 como podemos ver en la tabla de Planes de Frecuencia por país de la página

de The Things Network [35], pero no existe una regulación específica aplicada a la red LoRa.

5.2.1. Parámetros Regionales para la banda de frecuencia US902-928

Data rate	Configuration (SF + BW)	Bit rate (bit/s)	Maximum application payload size (bytes)
0	LoRa: SF10 / 125 kHz	980	11
1	LoRa: SF9 / 125 kHz	1760	53
2	LoRa: SF8 / 125 kHz	3125	125
3	LoRa: SF7 / 125 kHz	5470	242
4	LoRa: SF8 / 500 kHz	12500	242
8	LoRa: SF12 / 500 kHz	980	53
9	LoRa: SF11 / 500 kHz	1760	129
10	LoRa: SF10 / 500 kHz	3900	242
11	LoRa: SF9 / 500 kHz	7000	242
12	LoRa: SF8 / 500 kHz	12500	242
13	LoRa: SF7 / 500 kHz	21900	242

Tabla 10: valor de la tasa de transmisión de datos, configuración de LoRa, tasa de transmisión de datos y tamaño máximo del mensaje en cada caso.

Como mencionamos anteriormente para cada Plan de Frecuencia existen ciertos parámetros que hay que respetar, a continuación mencionaremos algunos de los

relativos a la banda ISM US902-928 basándonos en información extraída de la página de The Things Network [28].

Tasa de transmisión de datos: Como se ve en la *Tabla 10* los valores de tasa de transmisión de datos en esta banda van de 0 a 13, los valores del 0-4 y de 8-13 son los usados para la modulación LoRa y en particular de 8-13 solo se usan para la descarga de mensajes.

Todos los dispositivos de la banda US902-928 deben soportar una de las siguientes opciones de tasa de transmisión de datos: solo los valores de 0-4 y de 8-13 que son los mínimos necesarios para tener la certificación de LoRaWAN o todos los valores de 0-13 implementados en el dispositivo final.

Cuando se usa la activación a través del aire (OTAA) el dispositivo final debe mandar el mensaje para requerir unirse a la red en un canal seleccionado de manera aleatoria de una de las siguientes formas: con 64 canales (cada uno con un ancho de banda de 125 kHz) definidos usando la tasa de transmisión de datos 0 o con 8 canales (cada uno con un ancho de banda de 500 kHz) definidos usando la tasa de transmisión de datos 4.

Tamaño máximo de los paquetes: Hay un tamaño máximo de paquete que varía según la tasa de transmisión de datos, los valores para las diferentes tasas de transmisión de datos se pueden ver en la *Tabla 9*.

Otros parámetros a mencionar con requisitos para la banda US902-928 son la **banda de frecuencia por defecto** que como indica el nombre es la de 902-928 MHz, el **número de canales** que varía según si es upstream o downstream; para upstream hay dos opciones: 64 canales de 125 kHz u 8 de 500 kHz, y para downstream son 8 canales de 500 kHz. Los **canales por defecto** van del 0 al 71 y el **dwell time**, es decir, el tiempo que se requiere para una transmisión, depende de los canales: para los canales 0 al 63 es de 400 ms por canal y para los canales 64 al 71 no está determinado. No hay un límite para el **duty cycle**. La **potencia máxima de transmisión** es de +30 dBm, la **tasa de transmisión datos por defecto** es la de valor 8 y la **frecuencia por defecto** es 923.3 MHz.

5.2.2. Limitaciones en flujo de datos

Existe una política de uso equitativo de la red “Fair Use Policy” para la comunidad de The Things Network [36], en la que se establece un límite en la cantidad de datos que los dispositivos finales pueden enviar. La cantidad máxima de tiempo de paquetes de subida en el aire es de 30 segundos por día, por nodo. Además, la máxima cantidad de paquetes descargados por día es de 10 por nodo incluyendo los ACKs para los paquetes en subida confirmados. Si la red es privada estas limitaciones no aplican, este sería el caso del proyecto a desarrollar.

CAPÍTULO 6

Elección del Hardware

6.1. Gateway

Las puertas de enlace o Gateway, como ya fue mencionado en el marco teórico, son aquellos equipos que permiten unificar la información enviada por los nodos, en este caso mediante la tecnología LoRaWAN, y proveer de datos a los servidores de red. Existen equipos que poseen servidor de red incorporado, los cuales pueden incluirse fácilmente en sistemas de control de mayor jerarquía, logrando adaptar perfectamente este sistema dentro de otro mayor.

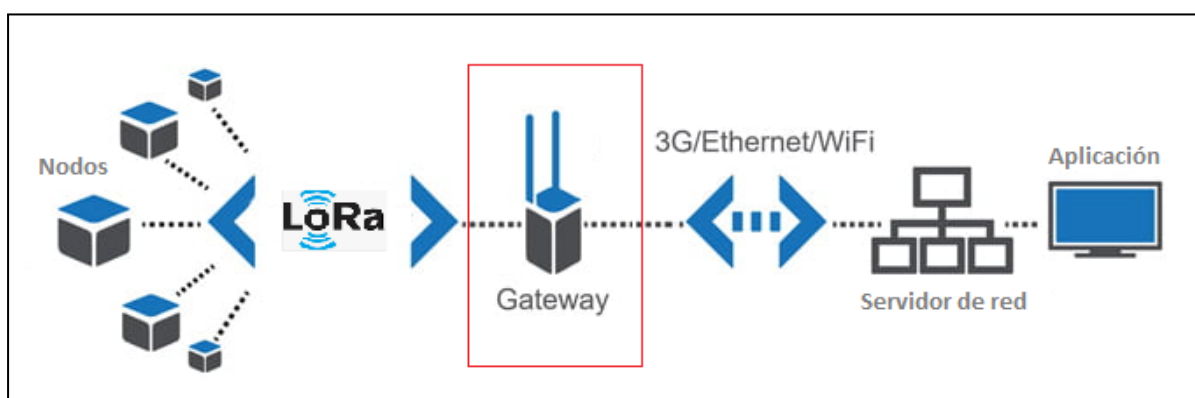


Figura 18: lugar del gateway en la red LoRa.

Las redes LoRaWAN están catalogadas en primer lugar como públicas o privadas, dependiendo del alcance buscado y el número de clientes que interactúan con ella.

Para esta aplicación, una red privada es la más adecuada para limitar el acceso a los propietarios del sistema. Dependerá del tamaño de la red si es conveniente que el Gateway posea un servidor incorporado o no. Se contempla en este modelo, que el servidor no sea incorporado para independizar al modelo de la marca de Gateway utilizado.

Por otra parte, como hemos visto en el capítulo 5 de este documento, en Uruguay las frecuencias de bandas ISM habilitadas para operar con este tipo de equipos, son las correspondientes a la denominada “Región 2” en el artículo 5.150 del reglamento de radiocomunicaciones de la UIT¹⁶, en la banda de frecuencias comprendidas entre 902 Mhz y 928 Mhz, centradas en 915Mhz.

Por lo cual, en la aplicación en estudio deberá contemplarse que el Gateway se comunique con los nodos en esta base de frecuencia.

En cuanto a la clase de comunicación LoRa más adecuada para una aplicación agroindustrial, en una amplia mayoría de nodos es conveniente la de tipo A, donde los equipos envían información con una frecuencia definida y no permanecen en comunicación activa consumiendo energía. Cabe la posibilidad de necesitar realizar una consulta o solicitud a un nodo particular, para que ejecute alguna acción o para que retorne información. Por lo cual, contar con la posibilidad de comunicar en la modalidad de clase B es buena decisión en la elección del Gateway.

Respecto al número de canales de comunicación, dependerá del número de nodos que tenga el proyecto. El propio gateway establece el número de nodos que puede gestionar y los canales que posee para lograrlo.

El modelo en estudio, considera una topología en estrella, para lo cual, el Gateway deberá conectarse a un servidor de red [31]. Por lo tanto, el equipo debe ser compatible con el servidor de red a utilizar, donde los más comunes son: TTN, ChirpStack, UrsaLink, entre otros [37] .

¹⁶ UIT: Unidad Internacional de Telecomunicaciones.

Finalmente, dada la aplicación agroindustrial en que se enmarca este modelo, el alcance de la cobertura de señal (alto nivel de factor de dispersión SF) y la resistencia a condiciones climáticas son factores muy importantes en la elección del dispositivo. En particular, existen equipos que son denominados Outdoor (de exterior) que contemplan la estanqueidad y la resistencia a los rayos solares; otros denominados Indoor (de interior) que no tienen protecciones acondicionadas al ambiente en que se encuentran y los equipos donde simplemente se establece el grado de estanqueidad IP, sin certificación integral en cuanto al ambiente adecuado de trabajo.

En el estudio de costos y características, se toma en cuenta a la marca Milesight, que posee equipos de bajo costo y posee todos los requisitos que se presentan en el sistema en estudio. Por lo tanto, se adquiere el equipo UG67 que posee un chip Semtech SX1302 con gran capacidad de tráfico de datos y bajo consumo de energía [38].





Figura 19: imágenes del gateway [38].

Este equipo es de tipo “Outdoor” IP67 con ocho canales de comunicación. Puede comunicarse con más de 2000 nodos hasta 15 km de distancia bajo las clases A, B y C. Adicionalmente, cuenta con la posibilidad de utilizar un servidor propio y es compatible con servidores web como TTN, Chirpstack, etc.

Cabe mencionar, que la elección de este equipo se realizó en conjunto con el Grupo de microelectrónica de la Universidad Católica, debido a la compatibilidad con otras experiencias que se buscan llevar a cabo en la universidad.

6.2. Nodo

La elección adecuada de los “End Points” o “Nodos”, es fundamental para el entorno agroindustrial, dado que son los elementos que enviarán información desde una larga distancia y en un ambiente poco favorable para equipos electrónicos. En particular, estos equipos podrían ser colocados en animales para su rastreo, condición de salud, etc. Así como en puntos estratégicos de un campo, para monitorear variables como humedad de suelo, presencia de insectos, status de funcionamiento de un alambrado electrificado, etc.

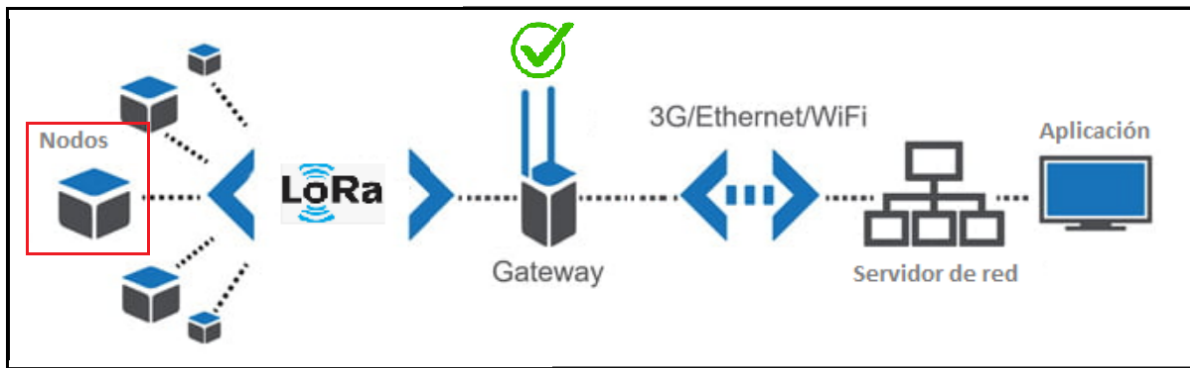


Figura 20: lugar del nodo en la red LoRa.

En todos los casos, se requiere que el equipo soporte las inclemencias climáticas y golpes, además de consumir muy poca energía para transmitir información a 15 km, contemplando el alcance del Gateway elegido para la aplicación.

Por lo tanto, un grado IP superior a IP67 con categoría Outdoor es necesario para la preservación del instrumento.

En el modelo de estudio, se relevó primariamente el hardware necesario para implementar nodos básicos de comunicación y evaluar costos para la implementación final.

Por consiguiente, se realizó un estudio de mercado sobre los tipos de equipos disponibles, proveedores, plazos de entrega y costos.

Adicionalmente, se observaron propuestas de nodos de entrenamiento y nodos genéricos con todos sus componentes incluidos.

6.2.1. Estudio de módulos de comunicación LoRa (Transceptor)

Dado que la performance del instrumento estaría en un gran porcentaje definido por la buena elección del transceptor y la antena, es que se realizó un relevamiento de

los equipos disponibles en el mercado, seleccionando a los siguientes como candidatos:

Transceptor	1	2	3	4	5	6
Alcance (m)	10000	5000	12000	8000	10000	8000
chip	1262	LLCC68	1262	1276	1278	1276
precio (usd)	10,22	3,98	8,86	4,5	9,08	14,47
Pedido minimo	2	2	2	1	2	2
Antena	sma	SMT	SMT	pin	smt	sma
Marca	Ebyte	Ebyte	Ebyte	RoarKit	RF-Star	Ebyte
Modelo	E22-900T30DC	E220-900T22S	E22-900M30S	RFM95W	RF-83SH-1	E32-915T30D
Voltaje (V)	2,5-5,5 (5)	2,5-5,5 (5)	2,5-5,5 (5)	3,3	2,5-5,5 (5)	2,5-5,5 (5)
Corriente (mA)	155T/13R	110T/11R	700T/16R	120T/10R	387T/15R	680T/15R



Figura 21: opciones de transceptores en el mercado encontrados en Alibaba, Aliexpress y Digikey.

Cabe destacar que la búsqueda se realizó mediante las plataformas Alibaba, Aliexpress y Digikey, donde el primer filtro de selección fue la unidad mínima de pedido y el costo de los equipos, el cual se encuentra entre los USD 3,98 y USD 14,47.

Se observó también, la relación entre el alcance de comunicación y el consumo de energía. Estas opciones, fueron las más beneficiosas en ambos sentidos, donde el alcance logrado va de los 5 km a los 12 km con un consumo de transmisión entre los 110mA y los 700mA. La opción 4 con 8 km de alcance, 120 mA en transmisión y bajo costo resultaría ser la más apropiada, sin embargo, los dispositivos de mayor consumo pueden deberse a amplificadores externos de potencia utilizados para llegar a señales de 30dbm, lo cual no sería necesario si estamos limitados a 20 dbm según la banda de frecuencia elegida US915. Por lo que podría evaluarse el uso de

los otros transceptores para corroborar su consumo bajo las mismas condiciones de potencia de señal.

6.2.2. Antena

Respecto a la antena, no hubo grandes diferencias entre modelos y precios. Se seleccionaron las adecuadas a los transceptores elegidos y teniendo en cuenta los mismos criterios de selección que con el transceptor.

Antena	5	6	7
Longitud (mm)	31	100	153
Conector	pin	SMA	ipex
Ganancia (dbi)	3	5	3
Frecuencia (Mhz)	915	915	915
Modelo	Helicoidal	Macho L	resorte
lote	2	2	1
Precio Lote (usd)	0,74	1,73	1,95



Figura 22: opciones de antenas en el mercado encontradas en Alibaba, Aliexpress y Digikey.

Teniendo en cuenta las experiencias en aplicaciones de este tipo, resultaría más apropiado acceder a una antena del tipo Nro.6, debido a su ganancia y a la posibilidad de usarla de forma outdoor.

6.2.3. Controlador/Sensores

En cuanto a la búsqueda del controlador adecuado, se presentó la dificultad de generar compatibilidad física de conexiones y la necesidad de poseer una sección

para la alimentación de todo el circuito. En este sentido, se observó la disponibilidad de placas de desarrollo con estas características, donde se consideran las conexiones del transductor y la alimentación del kit para el testeo de los chips de los módulos de comunicación LoRa, tanto en 433Mhz como en 915Mhz. Se observaron kits para los transductores 2 y 4 vistos anteriormente, de 5 km y 8 km [39][40]. El costo pasó a ser más elevado (USD15 a USD30), pero se ahorra el desarrollo y costo de los PCBs y componentes.



Figura 23: Kit de testeo de transductor EBYTE de 915Mhz, transductor opción 2 visto en la sección 6.2.1 [39].



Figura 24: Kit de testeo de transductor RFM95W de 915Mhz, transductor opción 4 visto en la sección 6.2.1 (opción preferente) [40].

En todos los kits observados, se determinó que sería necesario adquirir adicionalmente sensores, cables y en algunos casos las antenas.

Se realizó consulta a los proveedores, quienes respondieron con un excesivo plazo de entrega (mayor o igual a 60 días) e incluso comentaron cero stock de algunas partes, producto de la escasez de materias primas electrónicas.

Se planteó la idea de diseñar el PCB e incorporar periféricos a gusto, para reducir costos y resolver la disponibilidad de stock y compras mínimas requeridas por los proveedores. A pesar de bajar significativamente el costo, se observó que la dificultad y el tiempo que llevaría el desarrollo, excedían lo previsto para el desarrollo de la plataforma de simulación del modelo en estudio. Implicaba al menos dos etapas, una para la solicitud de elementos para el desarrollo de prototipos, para luego realizar la compra final del resto de los elementos necesarios. Un resultado de 120 días mínimos de espera por plazos de entrega y otros 30 días para el ensamble y programación de todo.

6.2.4. Nodo definido

Dados la problemática de los plazos de entrega, disponibilidad de Stock y costos, se generó la necesidad de buscar kits preparados para no depender de varios proveedores para la implementación. En ese momento es donde se observan los módulos de comunicación de la empresa Pycom, LoPy4 [41] y Fipy [42], con sus placas de desarrollo Pytrack [43] y Pysense [44]:



Figura 25: Módulo de comunicación LoRa Lopy4 [41].

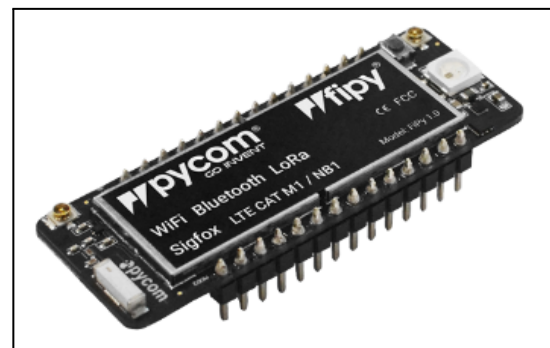


Figura 26: Módulo de comunicación LoRa Fipy [42] (Nueva generación Lopy 4).

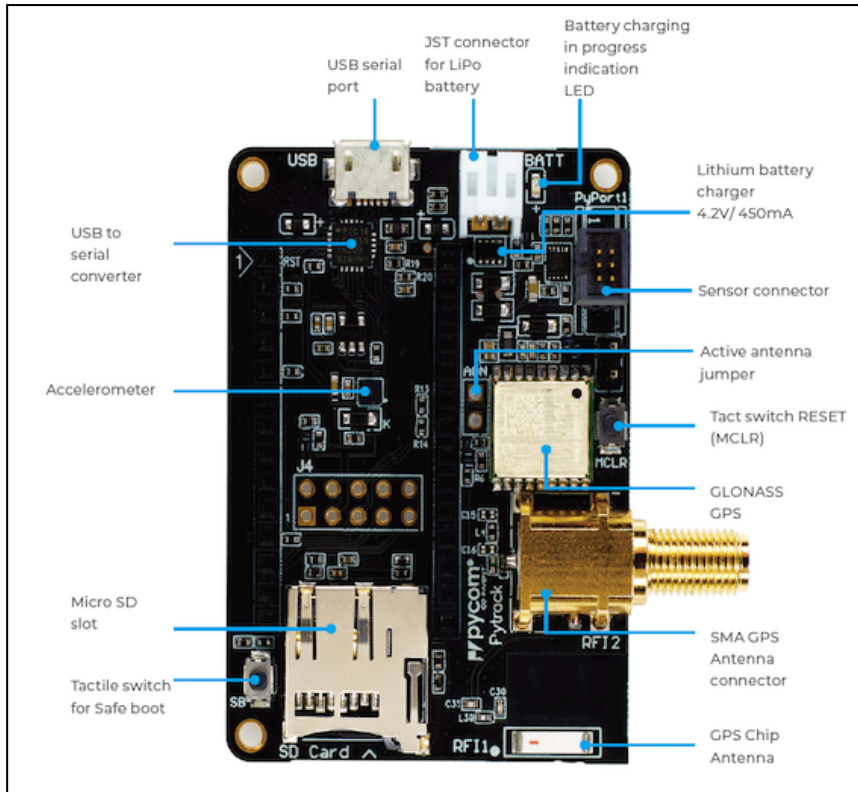


Figura 27: Placa de desarrollo Pytrack [43].

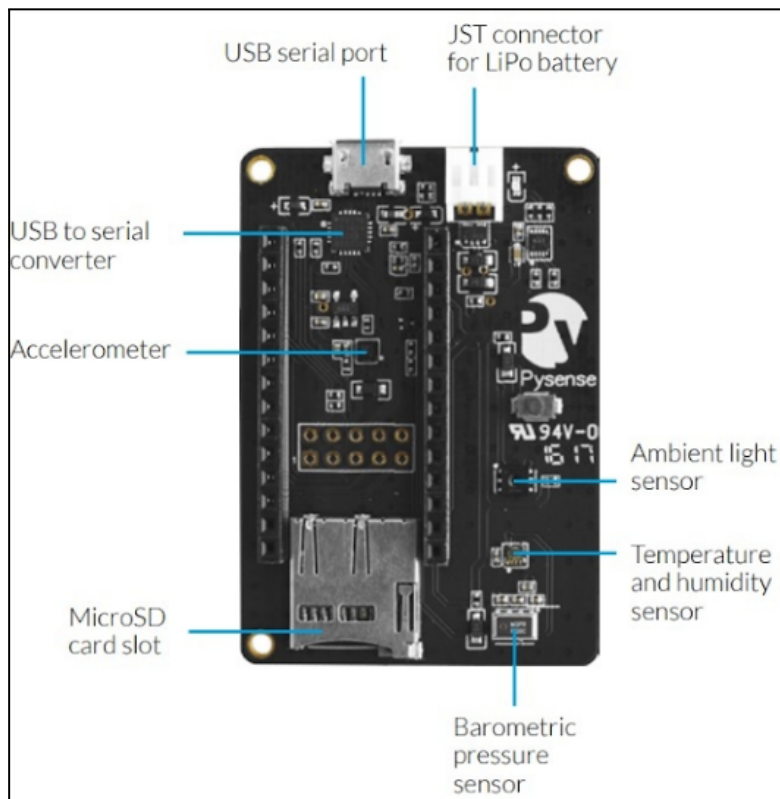


Figura 28: Placa de desarrollo Pysense [44].

Con la adquisición de estos kits, solo fue necesario adquirir las antenas y los cables micro sd.

En las placas de desarrollo Pytrack y Pysense, se cuenta con sensores de temperatura, humedad, luminiscencia, acelerómetro y GPS. Cuentan con un Transceptor Semtech SX1276 [45], el cual utiliza hasta 64 Bytes con CRC habilitado (Cyclic redundancy check) para su payload de transmisión y un Spreading Factor de hasta 12 (SF). Poseen una sensibilidad superior a 148 dB y una ganancia de potencia de 20 dB lo que lo hace un dispositivo muy adecuado para esta aplicación de largo alcance.

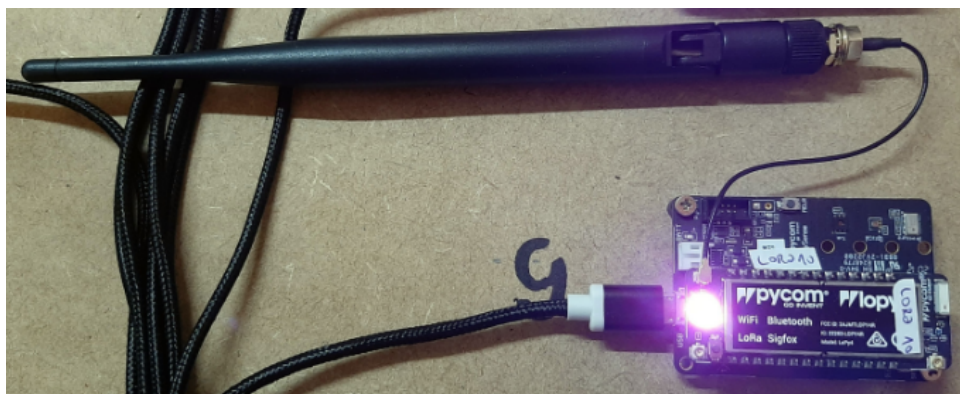


Figura 29: Nodo Pycom utilizado.

CAPÍTULO 7

Elección del Software

7.1. Servidor

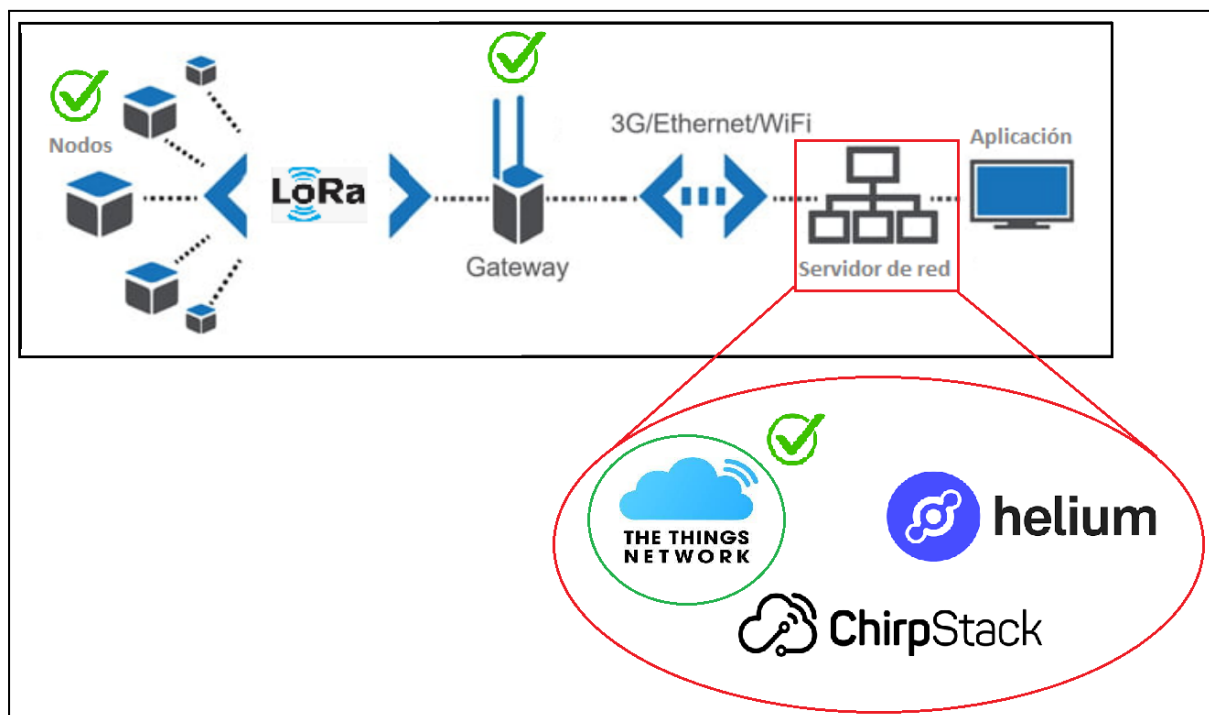


Figura 30: Lugar del servidor en la red LoRa.

Una vez resuelto el tipo de nodos a utilizar y el Gateway adecuado para la aplicación, es necesario configurar un servidor de red que consolide los datos enviados por los nodos. En este sentido, existen numerosos servidores desarrollados para sistemas IoT que pueden ser utilizados, pero cada uno tiene sus particularidades que deben ser consideradas. Por lo tanto, consideramos tres de estos servidores, para comparar y tomar una decisión. Se considera el caso de los servidores The Things Networks, Helium y ChirpStack, para los cuales se realizó la siguiente comparativa:




 THE THINGS NETWORK	 ChirpStack	 helium
Tiene una versión Open Source gratuita.	Sistema Open Source.	Costo asociado a cada paquete (0.00001 usd/p)
Bajo crecimiento de uso y prestaciones en versión Open Source.	Sistema muy utilizado.	Sistema en pleno crecimiento y desarrollo en EEUU.
Soporte técnico muy bueno y documentación disponible.	Soporte técnico muy bueno y documentación disponible.	Usuarios poco entrenados y baja cantidad de documentación.
Compatible con gran cantidad de dispositivos y Gateways.	Compatible con gran cantidad de dispositivos y Gateways.	Sistema en crecimiento. Limitado número de equipos compatibles.
Posibilidad de acceso a versión de red privada, con costo asociado.	Red privada implementada de gran nivel de seguridad.	Red privada implementada.
Transmisión de de datos limitada a 30s y 10 downlink por día por nodo.	Sin límite de uso.	Sin límite de uso, con costos asociados al número de dispositivos y transferencia de datos.
Servidor Web, fácil de interconectar y sin límites de end-points.	Servidor local, con restricciones de seguridad para interconectar. Presenta dificultades en la configuración.	Servidor Web, fácil de interconectar. Limite de end-points según cotización.

Tabla 11: Tabla comparativa entre las características que ofrecen los distintos servidores disponibles y considerados.

Dado que es necesario contar con un sistema simple de implementar, ágil de modificar y gratuito, la opción del servidor The Things Network resulta ser la más adecuada. A pesar de no contar con la seguridad que tal vez sea necesaria para

una aplicación comercial real, puede tenerse en cuenta su opción privada The Things Industries.

Las características genéricas del servidor de red son [46]:

1. Comprobación de la dirección del dispositivo final.
2. Autenticación de tramas y verificaciones de contadores de tramas.
3. Verificaciones.
4. Adaptación de velocidad de datos.
5. Responder a todas las solicitudes de capa MAC provenientes del nodo.
6. Reenvío de payloads de aplicaciones de enlace ascendente (Uplinks) a los servidores de aplicaciones apropiados.
7. Poner en cola los payloads de enlace descendente (Downlinks) provenientes de cualquier servidor de aplicaciones a cualquier nodo conectado a la red.
8. Reenvío de mensajes de solicitud de unión y aceptación de unión entre los nodos y los servidores de unión.

7.2. Aplicación cliente

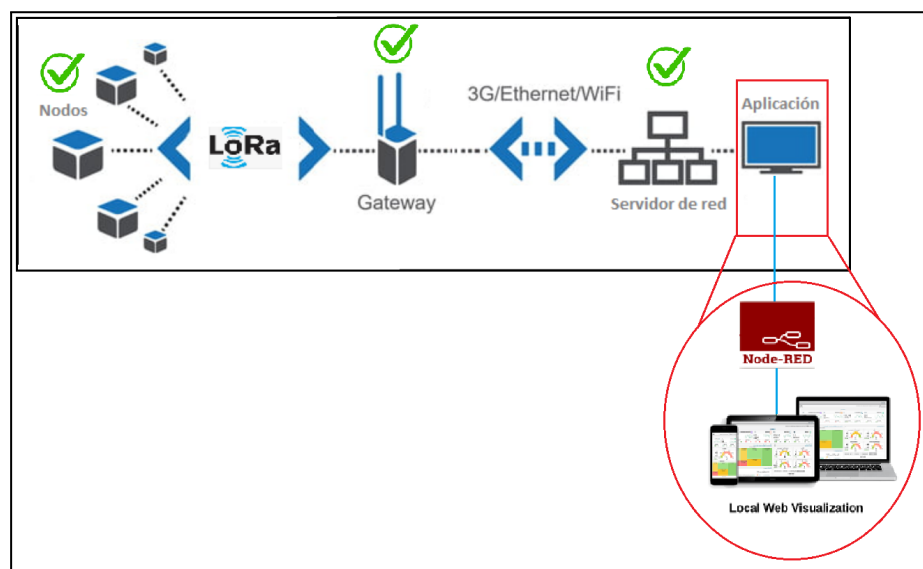


Figura 31: Lugar de la aplicación cliente en la red LoRa.

Una vez resuelto el servidor de red que consolida la información proveniente de los nodos, es necesario implementar una aplicación que permita almacenar, procesar y visualizar adecuadamente los datos.

Las opciones son muy variadas, pero se resumen en que cuanto mejor sea la gestión de los datos y facilidad de uso, es mayor el costo mensual. Hay integraciones como Ubidots¹⁷, TagoIO¹⁸, Akenza.IO¹⁹, etc. que poseen una tarifa mensual en función del número de nodos y el tráfico de datos. Cada integración puede tener un enfoque específico según el tipo de dispositivos conectados y las características adecuadas para la visualización.

La plataforma de ensayos que buscamos implementar, tiene como objetivo ser de fácil gestión, en lo posible gratuita y con la mayor apertura posible a modificar algoritmos de procesamiento de datos para lograr los indicadores de desempeño de la red que queremos monitorear. Dadas estas condiciones, es que la plataforma Open Source Node-Red resulta ser la más adecuada.

La plataforma Node-Red, basada en lenguaje Node.js (Javascript), propone un entorno de desarrollo gratuito donde mediante datos enviados desde The Things Network (TTN) en formato de mensajes MQTT, se puede usar funciones interconectadas en modo function-blocks que decodifican y procesan los datos a gusto y los proyecta en un dashboard muy sencillo.

Puede ser ejecutada tanto en la nube, como en un PC, Raspberry o similar y no requiere grandes recursos para su funcionamiento.

¹⁷ <https://ubidots.com/>

¹⁸ <https://tago.io/>

¹⁹ <https://akenza.io/>

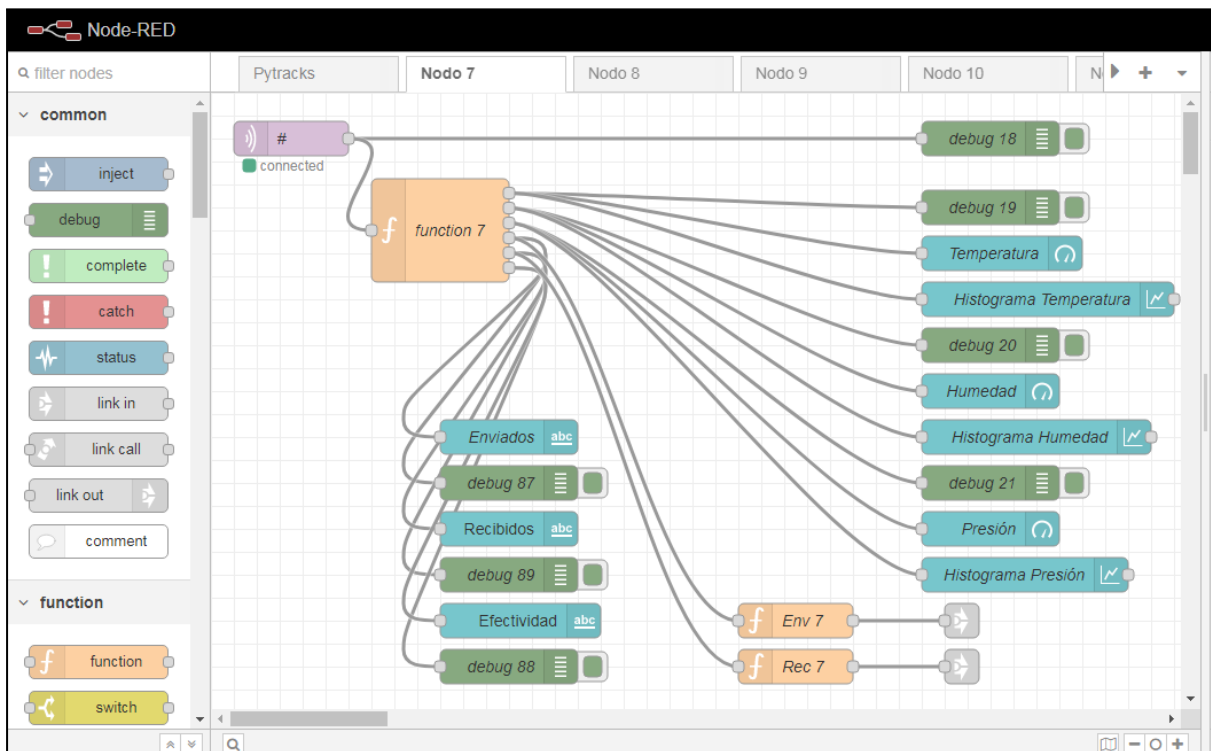


Figura 32: Entorno de desarrollo Node-Red. Decodificador de mensaje MQTT enviado por el Nodo 7.

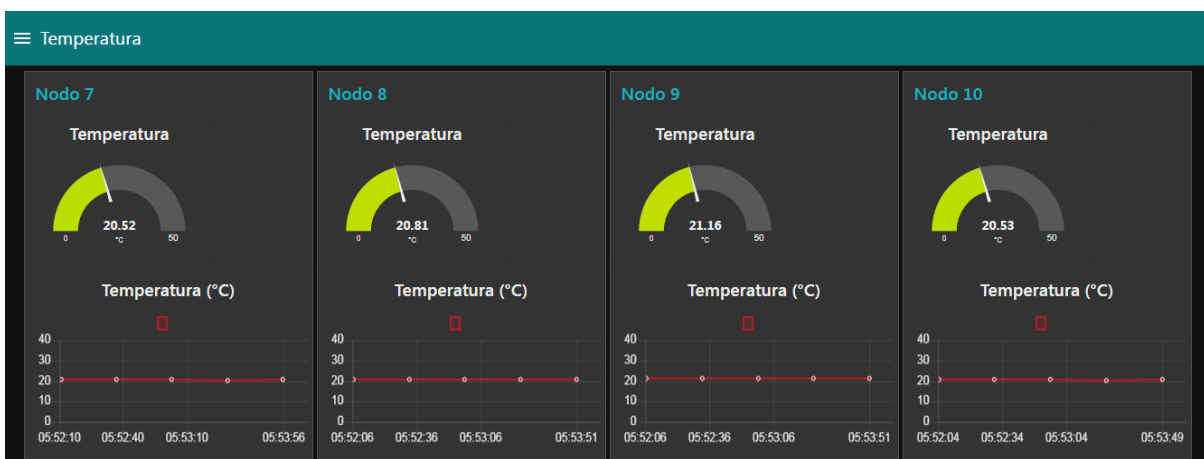


Figura 33: Dashboard de datos de temperatura decodificados y ordenados de los Nodos 7, 8, 9 y 10 con histórico de últimos 5 datos enviados.

CAPÍTULO 8

Implementación

Los modelos planteados en el capítulo 2.4 y los requerimientos vistos en el capítulo 3, son los puntos de partida para la implementación del banco de pruebas mencionado en los objetivos de este proyecto.

Primariamente, se contemplan pruebas con un único nodo para evaluar su performance en cuanto al alcance de señal, velocidad, autonomía, confiabilidad y actualizaciones remotas.

Posteriormente, se implementó un banco de pruebas para poder analizar el comportamiento de una red con múltiples nodos.

8.1. Pruebas de campo con nodo único

Se realizó la conexión de un único nodo con la intención de ver su comportamiento en la red. Se hicieron pruebas de alcance según el modelo planteado, velocidad, confiabilidad y una evaluación de su consumo de energía para estimar su autonomía.

8.1.1. Alcance

Según el requerimiento de alcance visto en el capítulo 3.2, la distancia mínima requerida para este modelo es de 4 km. Se realizan ensayos de alcance en el predio del balneario Guazuvirá.



Figura 34: Emplazamiento de 1000Has utilizado para las pruebas de alcance en el balneario Guazuvirá, Canelones, Uruguay. Imagen satelital tomada mediante Google Maps.

Se configura en este nodo, un ancho de banda de 125 khz, un factor de dispersión SF=10 y modo de funcionamiento clase A. Se envían sólo las coordenadas de geolocalización en el mensaje.

Se instala el Gateway a 5m de altura en el punto establecido. Se observa que es una zona de acacias y pinos de gran altura.



Figura 35: Monitoreo de señal en Servidor TTN de Nodo utilizado en la experiencia. Imágen tomada al momento de realizar la experiencia.

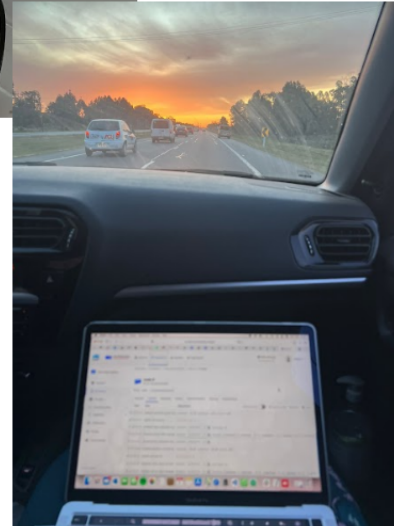


Figura 36: Emplazamiento del Gateway a 5m de altura. Imágen tomada al momento de realizar la experiencia.



Como resultado de la experiencia, se observó que el mayor alcance de señal fué de 5,5 km en una zona rural, pero con sectores forestados.

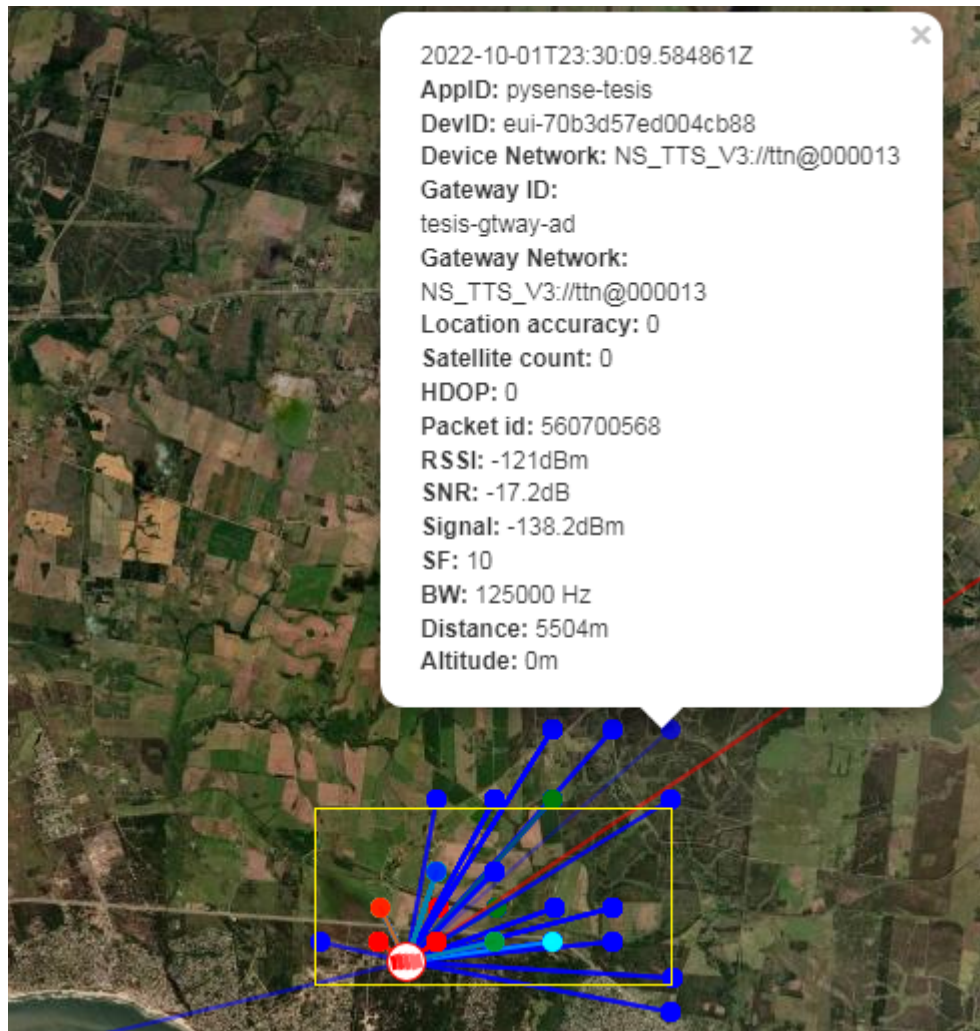


Figura 37: Registro de ensayo mediante la aplicación Web de TTN Mapper.

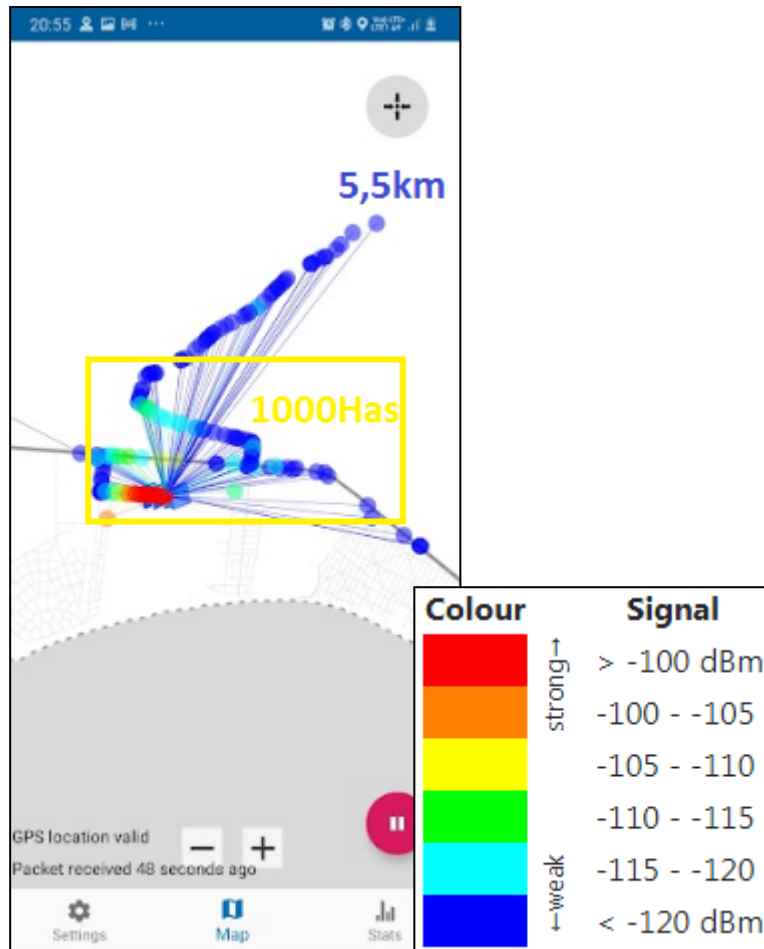


Figura 38: Ensayo realizado con la aplicación TTN Mapper.

Se observa en la experiencia que el alcance de la señal fue consistente con el objetivo de 4 km, superando en 1,5 km el mismo.

Tal como el manual del Gateway indica, la altura y el entorno del equipo es fundamental para maximizar su alcance. En este sentido, se entiende que un lugar más despejado y con mayor altura, sería más beneficioso.

La pérdida de señal a los 5,5 km, se debió a que el nodo se encontraba detrás de una zona forestada, la cual por su volúmen impedía una potencia de señal adecuada.

La potencia de señal observada, fue desde los -44dBm (junto al Gateway) a los -138dBm en el punto más alejado con un componente de ruido de 17dB.

8.1.2. Velocidad

En esta experiencia se considera el envío de 4 bytes de información, en un ancho de banda de 125 kHz y un factor de dispersión de SF10. Bajo estas condiciones, el Time On Air teórico sería de 329.7ms.

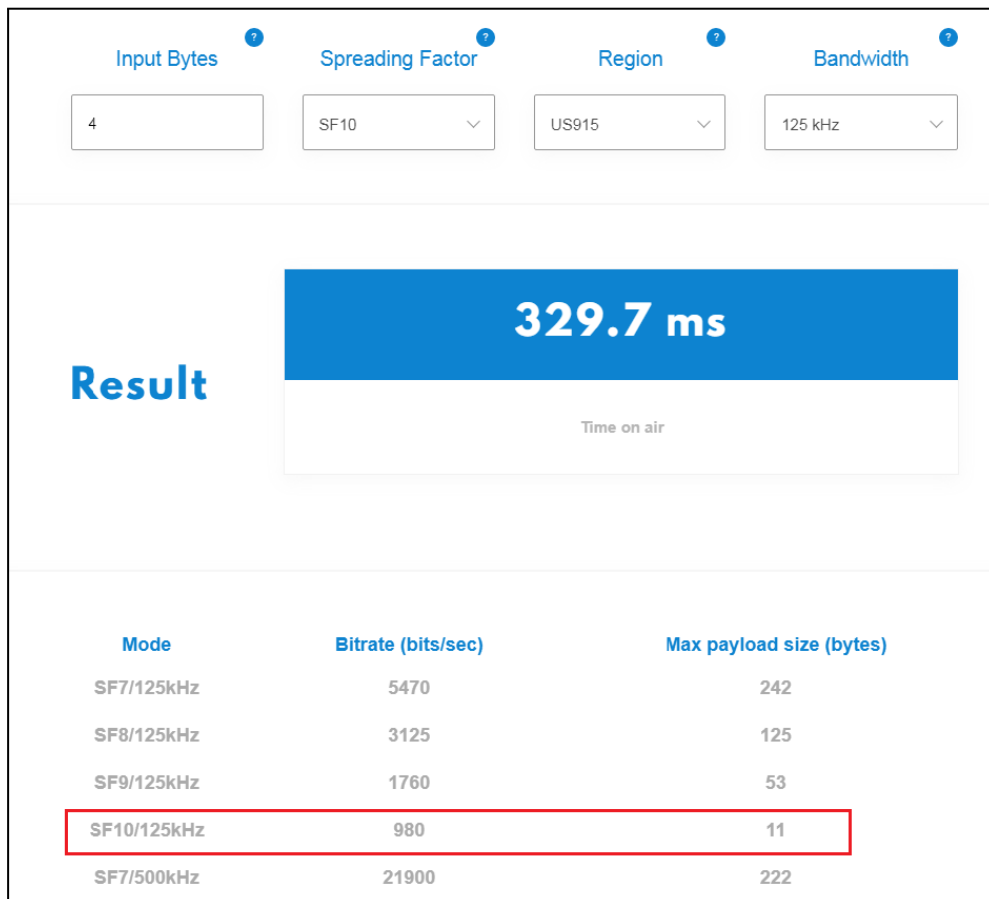


Figura 39: Calculadora de TOA de plataforma The Things Network [47].

En la experiencia, se obtuvo un TOA entre 329,7ms y 370,7ms como se puede ver en la Figura 55. Lo cual es consistente con lo esperado según las distancias entre los dispositivos.

```
"data_rate": {
  "lora": {
    "bandwidth": 125000,
    "spreading_factor": 10
  }
},
"coding_rate": "4/5",
"frequency": "905300000",
"timestamp": 2837060403,
"time": "2022-10-01T21:54:21.430Z"
},
"received_at": "2022-10-01T21:54:22.617272501Z",
"consumed_airtime": "0.370688s",
```

```
"data_rate": {
  "lora": {
    "bandwidth": 125000,
    "spreading_factor": 10
  }
},
"coding_rate": "4/5",
"frequency": "904300000",
"timestamp": 2532220819,
"time": "2022-10-01T21:49:16.590Z"
},
"received_at": "2022-10-01T21:49:17.764547089Z",
"consumed_airtime": "0.329728s",
```

Figura 40: Datos de Time on Air extraídos del servidor.

8.1.3. Autonomía

En cuanto al consumo de energía, como era de esperar, el mayor consumo se presenta en el momento de la transmisión, donde alcanza en el entorno de los 107,1mA.

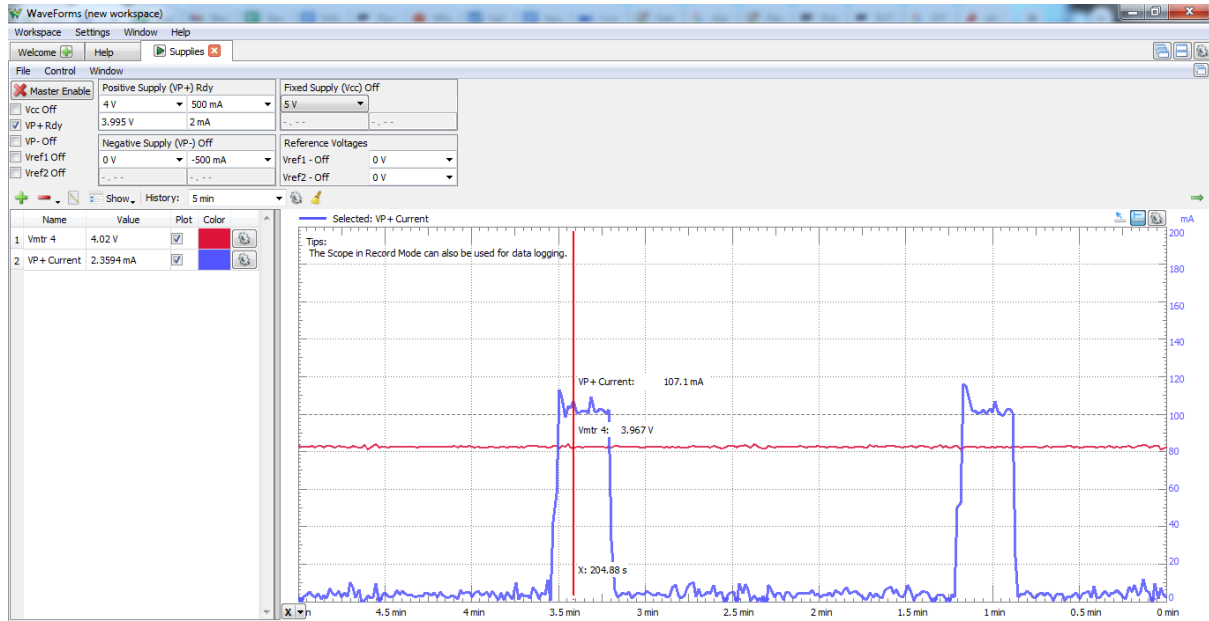


Figura 41: Gráfico de consumo de energía utilizando la herramienta WaveForms de DIGILENT, marcador en máximo consumo.

El consumo durante el modo Sleep del nodo, debió realizarse con un multímetro debido a la baja magnitud de lectura, la cual se observó entre 40 uA y 46 uA. Esta lectura, resultó consistente con la documentación de Pycom [41][42][43][44].

Cabe mencionar que la alimentación del nodo se realizó mediante su puerto de alimentación de batería, emulando una alimentación real a un voltaje acorde a una batería de litio.

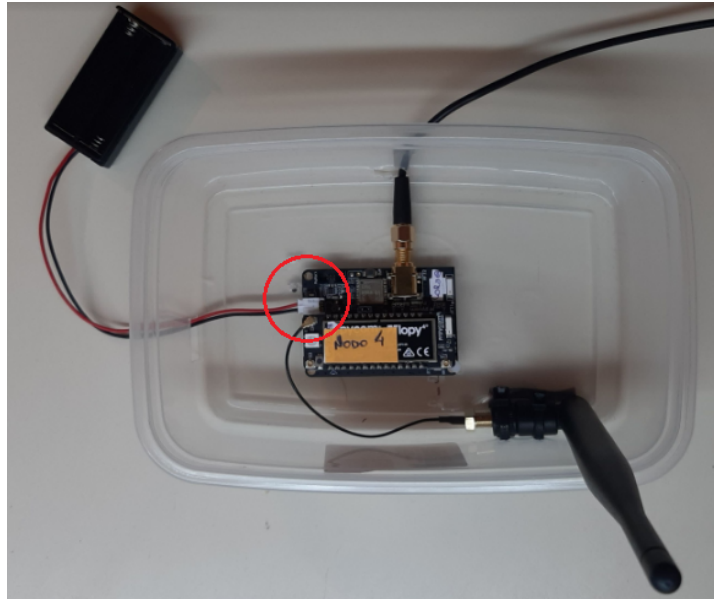


Figura 42: Prototipo para medición de consumo de energía.

Por lo analizado en los requerimientos del modelo en el capítulo 3.1, el consumo observado para un nodo con GPS es muy bueno. El tipo de dispositivo utilizado no contaba con la lectura de tantos sensores como se prevé por ejemplo en un collar sanitario, pero dado que el GPS es uno de los sensores con mayor consumo, se considera un buen punto de comparación.

Según lo que pudo observarse, el pulso de localización GPS y transmisión fue de 21 segundos (Puede observarse en la *Figura 41*), lo cual bajo un hipotético caso de reporte de localización cada 6 horas, la duración de la batería de 1000mAh sería:

$$\frac{1000mAh}{(107,1mA*4*1*0,005833h+0,04mA*24)*360} = 0,8 \text{ Años}$$

Lo cual, resulta consistente con el objetivo de duración no menor a 6 meses.

$$\text{Duración de batería (años)} = \frac{\text{Capacidad de batería (mAH)}}{(\text{Itx} * \text{msg/día} * \text{Npackets} * t + \text{Isleep} * \text{tsleep}) * 360}$$

Donde:

Itx: Corriente de consumo de dispositivo en mA por medición y transmisión de mensaje.

msg/día: El número de mensajes a enviar por día.

Npackets: Número de paquetes por mensaje

t: Duración de medición y envío de mensaje en horas.

Isleep: Corriente de consumo de dispositivo en mA durante el modo Sleep.

tsleep: tiempo en horas del modo Sleep por día.

8.1.4. Confiabilidad

Para la medición de confiabilidad de la comunicación de un único nodo a largas distancias, se observaron durante la experiencia los paquetes enviados al servidor TTN durante un lapso de 30 minutos.

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AY0VaCSGYfWmXerrw4/zDQ==",
  "f_port": 2,
  "frm_payload": "kw26FQEA",
  "decoded_payload": {
    "altitude": 0,
    "latitude": -34.754878245011,
    "longitude": -55.6202988689137,
    "packets": 1
  }
},

```

Figura 43: Payload de inicio de experiencia con número de paquete enviado 1.

El conteo final de la experiencia fue de **120** mensajes enviados con **20** perdidos, resultando en un porcentaje de **efectividad de 83%**.

Por motivos prácticos, debió realizarse la experiencia con un vehículo en movimiento y se observó notoriamente que la mayor pérdida de paquetes se vió

influenciada por la velocidad de desplazamiento en zonas donde no era posible detener la marcha.

Adicionalmente, se observó que el segundo factor de pérdida de mensajes fue la presencia de obstáculos como zonas forestadas o edificaciones en medio de la línea de vista entre el nodo y el gateway.

Para finalizar, se tomó lectura de un total de 257 mensajes con el siguiente reporte de la aplicación TTN Mapper.

Total	
Number of packets	257
Number of seen gateways	1
Number of mapped gateways	1
Last packet	
Time	2022-10-01T23:54:42Z
Gateway IDs	tesis-gtway-ad
Maximum RSSI	-51.0 dBm
Maximum SNR	9.199999809265137 dB
Frequency	905.1 MHz
Data rate	SF10BW125

Figura 44: Reporte de la aplicación TTN Mapper en dos incursiones.

En el reporte, se observa que el máximo indicador de intensidad de señal recibida (RSSI) fue de -51.0dBm, el cual seguramente se dió en cercanías del Gateway y que la máxima relación Señal-Ruido (SNR) fue de 9.2dB lo cual resultó ser muy bueno para las características de la experiencia y teniendo en cuenta que el mínimo SNR requerido para demodular adecuadamente la señal en SF10 es de -15dB²⁰.

8.1.5. Actualizaciones remotas

A la hora de investigar sobre las actualizaciones remotas de firmware nos encontramos con que los métodos que sugiere Pycom para llevarlas a cabo dependen del uso de una red WiFi en complemento con LoRa [48]. De los métodos

²⁰ <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/rssi-and-snr/>

sugeridos por Pycom probamos la parte que involucra LoRa del que consiste en enviarle un comando especial al dispositivo final vía LoRa que, al recibirlo, se conecta a una red de WiFi y luego a un servidor que se encuentre corriendo en la misma red. Este servidor genera un archivo que le indica al dispositivo a qué versión debe actualizarse y de donde obtener la información para la actualización.

Se debe incluir en el dispositivo final una librería que funcione como interfaz con el servidor y que se ejecute cuando el dispositivo recibe un comando especial.

En nuestro caso este comando especial son los bytes [01 02 03] cómo se puede apreciar en la imagen, una vez que el dispositivo los recibe imprime en pantalla “Comienza actualización OTA” y comienza a ejecutar las funciones definidas en la librería.

```
mode:DIO, clock div:1
load:0x3fff8020, len:8
load:0x3fff8028, len:2140
ho 0 tail 12 room 4
load:0x4009fa00, len:19760
entry 0x400a05bc
Smart Provisioning started in the background
See https://docs.pycom.io/smart for details
Not yet joined...
Not yet joined...
Not yet joined...
Joined LoRa network
b'\x04\x05\x06'
Data recibida: b'\x01\x02\x03'
Comienza actualizacion OTA
```

Figura 45: Imágen de la consola del nodo informando que comienza la actualización de firmware.

Se podría considerar también una actualización de datos remota enviando el ejecutable por LoRa al dispositivo final. Para estudiar la viabilidad de esto consideramos como ejemplo la carpeta con la versión 1.20.2.rc11 de Lopy4 descargada de [49] que tiene un tamaño de 1.2MB y tomando en consideración que a los Lopy4 solo se les puede configurar un DR de 0 a 7 lo que implica, si miramos

la *Tabla 10* incluida en el capítulo 5, que el payload más alto que se podría alcanzar, eligiendo el DR4, es de 242 bytes, entonces enviar toda la información nos llevaría 5200 paquetes de 242 bytes. A su vez el bitrate más alto que se podría alcanzar, eligiendo el DR4, es de 12500 bit/s, por lo tanto cada paquete tardaría 0,15 segundos en enviarse. Teniendo en cuenta además que, en las pruebas de campo nos encontramos con que si el tiempo de sleep era menor a 6 segundos el dispositivo fallaba, serían 6,15 segundos por paquete lo que implicaría casi 9 horas de envío constante de paquetes. Considerando el consumo de energía estudiado en este mismo capítulo (8.1.3) si quisiéramos actualizar el firmware de ese mismo dispositivo gps una vez por año tendríamos que modificar la ecuación utilizada en el capítulo 8.1.3 de la siguiente forma:

$$\frac{1000mAh}{((107,1mA*4*1*0,005833h+0,04mA*24)*360+2*(107,1mA*5200*0,00004h))} = 0,76$$

Se consideraron dos actualizaciones teniendo en cuenta que en el consumo de energía sin actualizaciones el resultado de duración de la batería de 1000mAh era de 10 meses. Se puede apreciar que, a pesar de que hay una variación en la duración de la batería, este resultado, que equivale a un poco más de 9 meses cumple el objetivo del modelo de no cambiar las baterías en menos de 6 meses.

Teniendo en cuenta que el modelo de red que estamos estudiando es grande y no es viable, dado el tiempo que toma el envío del total de paquetes, actualizar de a un nodo por vez, consideramos que el método a implementar que mejor se adapta es enviar los paquetes con una comunicación de tipo broadcast por parte del gateway.

En el caso de trabajar en una red pública habría que tener en cuenta el que el Time On Air para la actualización de cada nodo es mayor que el permitido por la Fair Use Policy, pero en este caso, al ser una red privada, esta consideración se puede pasar por alto.

Es por esto que podemos considerar viable y un modelo a estudiar en futuros proyectos actualizar el firmware vía LoRa.

8.2. Desarrollo de plataforma de prueba, simulación modelo

Se realiza un prototipo primario con los dispositivos finales mediante cuatro módulos de 10 dispositivos cada uno.

Resulta una implementación adecuada y fácil de transportar, por lo que se realiza la disposición de estos módulos tal cual el prototipo.

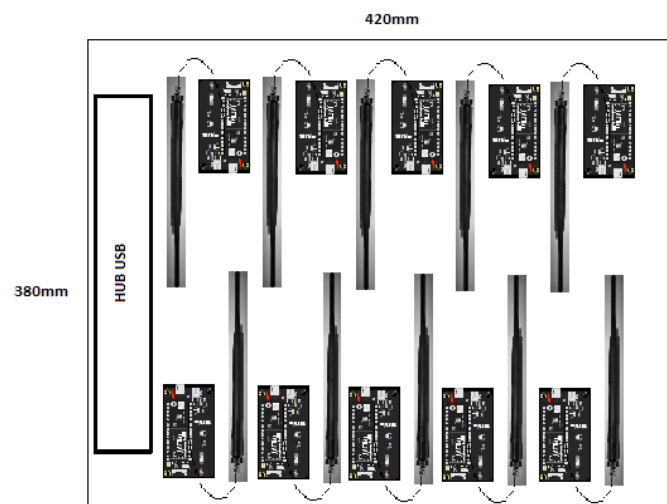


Figura 46: Prototipo de módulos de dispositivos.



Figura 47: Módulos con dispositivos finales de la plataforma de pruebas.

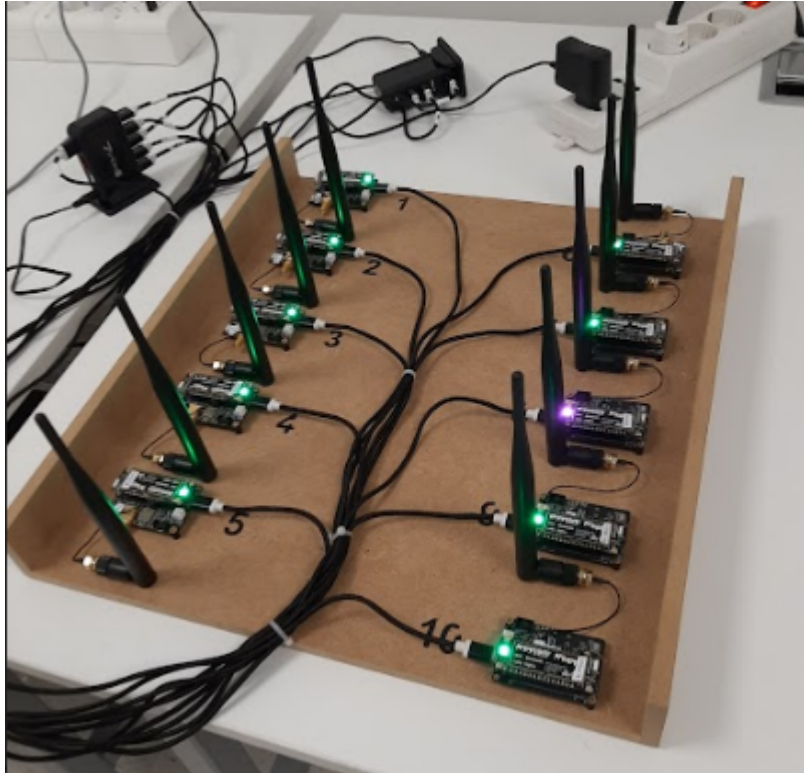


Figura 48: Módulo 1 de dispositivos finales de la plataforma de pruebas.

8.2.1. Estudio de colisiones, eficacia de transmisión

Para el estudio de colisiones, se trabajó con un Dashboard en Node-Red donde se expresaron los 35 nodos, los mensajes enviados por cada uno de ellos y el número real de mensajes recibidos por el servidor.

Comunicaciones

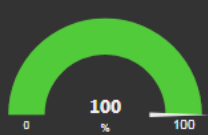
Estadística general		Efectividad de red		N1_PT		N2_PT		N3_PT		N4_PT		N5_PT							
Paquetes enviados	19			Env	5	Env	19	Env	12	Env	12	Env	14						
Paquetes recibidos	19			Rec	4	Rec	19	Rec	11	Rec	11	Rec	37						
		%	80	%	100	%	91.7	%	91.7	%	264.3								
N6_PT		N7_PS		N8_PS		N9_PS		N10_PS		N11_PS		N12_PS		N13_PS		N14_PT		N15_PT	
Env	1	Env	7	Env	14	Env	15	Env	14	Env	15	Env	21	Env	45	Env	36	Env	36
Rec	1	Rec	7	Rec	51	Rec	15	Rec	13	Rec	14	Rec	20	Rec	41	Rec	36	Rec	35
%	100	%	100	%	364.3	%	100	%	92.9	%	93.3	%	95.2	%	91.1	%	100	%	97.2
N16_PT		N17_PT		N18_PT		N19_PS		N20_PS		N21_PS		N22_PS		N23_PS		N24_PT		N25_PT	
Env	36	Env	37	Env	36	Env	36	Env	25	Env	44	Env	49	Env	50	Env	24	Env	24
Rec	33	Rec	36	Rec	35	Rec	33	Rec	25	Rec	39	Rec	40	Rec	41	Rec	24	Rec	23
%	91.7	%	97.3	%	97.2	%	91.7	%	100	%	88.6	%	81.6	%	82	%	100	%	95.8
N26_PT		N27_PT		N28_PT		N29_PS		N30_PS		N31_PS		N32_PS		N33_PS		N34_PT		N35_PT	
Env	25	Env	25	Env	20	Env	23	Env	27	Env	102	Env	101	Env	102	Env	107	Env	104
Rec	24	Rec	25	Rec	19	Rec	23	Rec	26	Rec	97	Rec	91	Rec	97	Rec	101	Rec	100
%	96	%	100	%	95	%	100	%	96.3	%	95.1	%	90.1	%	95.1	%	94.4	%	96.2

Figura 49: Dashboard para estudio de comunicaciones.

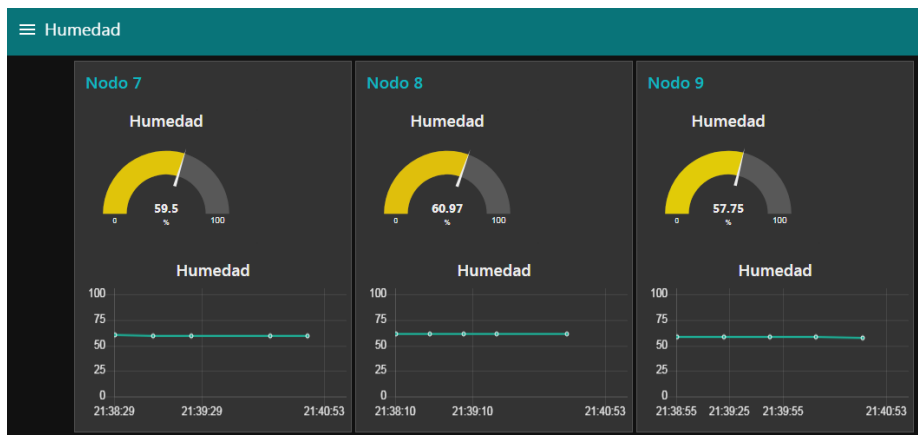


Figura 50: Dashboard para estudio de datos de humedad recibidos.

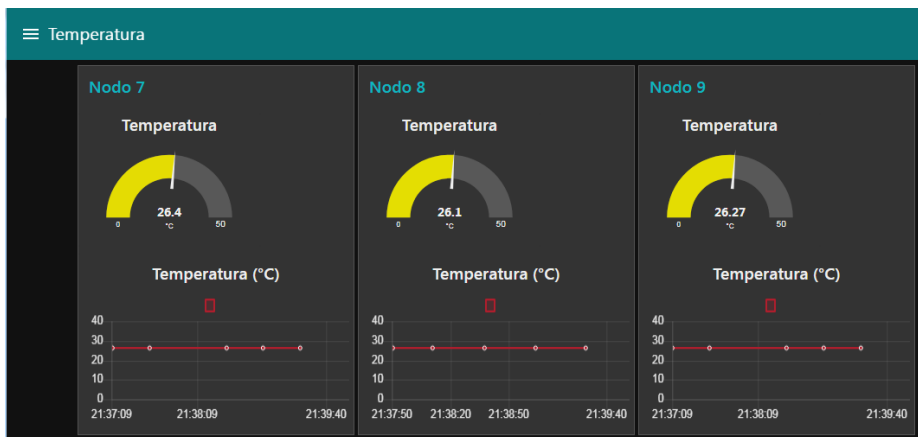


Figura 51: Dashboard para estudio de datos de temperatura recibidos.

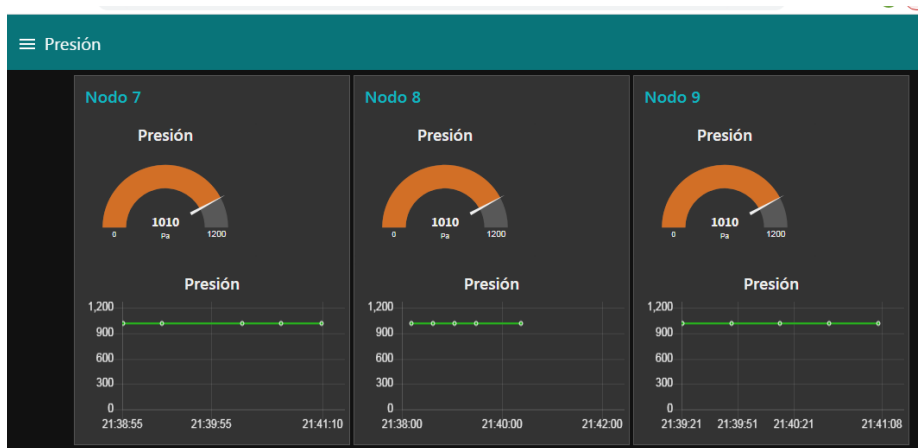


Figura 52: Dashboard para estudio de datos de presión recibidos.

Para los modelos vistos, se realizó un análisis de pérdida de paquetes por pruebas de estrés, donde se evaluó la pérdida de mensajes en función del número de mensajes enviados por unidad de tiempo.

Se plantea que según los tres modelos y los requerimientos vistos en el capítulo 3, el número de nodos necesarios para cada uno serían:

Agronegocio/Dispositivo	De tipo general	Adicionales de tipo especial
Ganadero	1510	50
Agrícola	220	10
Forestal	120	0

Tabla 12: Número de nodos esperados para cada modelo. De tipo general con baja carga de datos y baja frecuencia y de tipo especial con alta carga de datos y alta frecuencia.

Se plantean entonces dos pruebas para analizar colisiones y pérdida de datos con múltiples nodos:

1. **Igual carga de datos en todos los nodos:** Se considera que cada nodo envía un único paquete por mensaje. Se simula el número de nodos repitiendo el envío de los 35 disponibles hasta contabilizar el número de nodos correspondientes a cada modelo dentro de 10 minutos.
2. **Mayor carga de datos en nodos especiales (Modelo agrícola con cámara de fotos):** Se considera que 30 nodos envían un único paquete por mensaje, pero se simulan cámaras de fotos con los cinco nodos restantes. Se envían múltiples paquetes por mensaje (20 mensajes para cada imagen).

Prueba 1: Igual carga de datos en todos los nodos

Se consideran 7 etapas de 10min cada una con distinto número de nodos para evaluar pérdida de paquetes. Las primeras 6 refieren a los modelos planteados y una última de 3150 nodos para evaluación máxima del sistema.

Prueba 1: Frecuencia de transmisión							
Modelo		Forestal	Agrícola		Ganadero		
#Nodos		170 (1)	225 (2)	300 (3)	1190 (4)	1330 (5)	1630 (6)
Segundos	1	120	120	120	20	20	20
	2	120	120	120	20	20	20
	3	120	120	120	20	20	20
	4	120	120	120	20	20	20
	5	120	120	120	20	20	20
	6	120	120	120	20	20	20
	7	120	120	120	20	20	20
	8	120	120	120	20	20	20
	9	120	120	120	20	20	20
	10	120	120	120	20	20	20
	11	120	120	120	20	20	20
	12	120	120	120	20	20	20
	13	120	120	120	20	20	20
	14	120	120	120	10	10	10
	15	120	120	120	10	10	10
	16	120	120	120	10	10	10
	17	120	120	120	10	10	10
	18	120	120	120	10	10	10
	19	120	120	120	10	10	10
	20	120	120	120	10	10	10
	21	120	120	120	10	10	10
	22	120	120	120	10	10	10
	23	120	120	120	10	10	10
	24	120	120	120	30	30	30
	25	120	120	120	30	30	30
	26	120	120	120	30	30	30
	27	120	120	120	30	30	30
	28	120	120	120	30	30	30
	29	120	120	120	30	30	30

	30	120	120	120	30	30	30
	31	150	40	20	50	15	6
	32	150	40	20	50	15	6
	33	150	40	20	50	15	6
	34	150	40	20	50	15	6
	35	150	40	20	50	15	6

Tabla 13: Frecuencia de transmisión para cada nodo en la Prueba 1.

A continuación incluimos una tabla con la presentación de resultados de las 7 etapas mencionadas anteriormente. Los nodos se configuraron con un DR de valor 3 que, como se puede ver en la *Tabla 10*, implica un SF7, un ancho de banda de 125kHz y un bitrate de 5470 bits/s.

ETAPA	MODELO	CANTIDAD DE NODOS (emulados)	PAQUETES ENVIADOS	PAQUETES RECIBIDOS	EFFECTIVIDAD DE LA RED
1.1	Forestal	170	173	172	99.4%
1.2	Agrícola	225	225	223	99.1%
1.3	Agrícola	300	301	293	97.3%
1.4	Ganadero	1190	1193	1097	92%
1.5	Ganadero	1330	1324	1206	91.1%
1.6	Ganadero	1630	1632	1468	90
1.7	Evaluación máxima del sistema	3150	3024	2682	88.7%

Tabla 14: Resultados de la Prueba 1.



Figura 53: Resultados generales etapa 1.1.



Figura 54: Resultados generales etapa 1.2.



Figura 55: Resultados generales etapa 1.3.



Figura 56: Resultados generales etapa 1.4.



Figura 57: Resultados generales etapa 1.5.



Figura 58: Resultados generales etapa 1.6.



Figura 59: Resultados generales etapa 1.7.

En resumen, como era de esperar, se observa un decaimiento de la eficacia de la comunicación a medida que aumentamos el número de dispositivos a transmitir en la ventana de tiempo definida de 10 min.

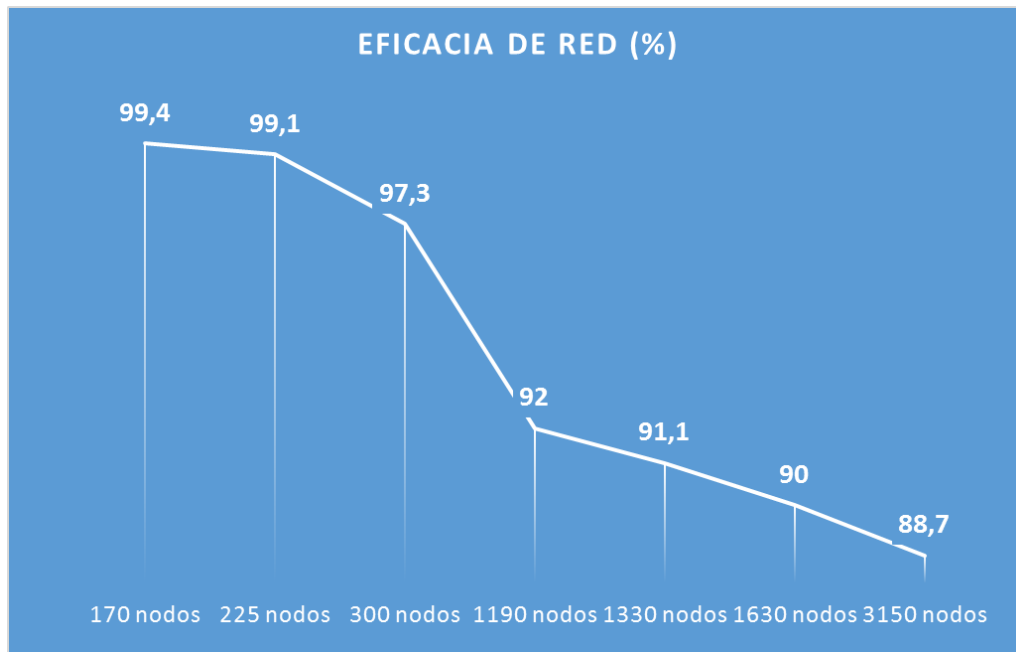


Gráfico 1: Eficacia de red en función de número de nodos

Se puede observar que tanto para el modelo agrícola como para el forestal, la eficacia supera el 96% que se tenía como objetivo. Sin embargo, para el modelo ganadero no se logra esta cifra, la cual se presenta en torno al 91%.

Por su parte, la prueba de estrés máximo de 3150 nodos, resulta mejor de lo esperado, con 88,7% de eficacia de transmisión.

Es importante observar, que esta prueba de estrés del sistema, asume que los 1550 dispositivos desplegados en el establecimiento ganadero enviarán todos un mensaje dentro de los 10 min definidos para la experiencia, lo cual en la realidad no será así. Estos instrumentos enviarán datos en su mayoría cada 4 o 6 horas, salvo excepciones.

Prueba 2: Mayor carga de datos en nodos especiales (Modelo agrícola con cámaras que transmiten imágenes)

Se consideran 3 etapas de 10min cada una con mismo número de nodos pero simulando en la primera, una red de 239 nodos donde hay 9 de ellos que son cámaras de fotos, la segunda etapa con 241 nodos donde hay 11 que son cámaras y la tercera con 248 nodos donde 18 de ellos son cámaras.

Adicionalmente, se toma una última etapa donde se exige al máximo el sistema, considerando 368 nodos con 11 cámaras.

Prueba 2: Carga de datos				
Modelo	Agrícola			
Nodos	239	241	248	
Segundos	120	120	120	Nodo del 1 al 30
	15	15	15	Nodos especiales
	15	15	15	
	200	200	100	20 paquetes por mensaje (Cámaras)
	200	150	100	
	200	150	100	
	9 cámaras	11 cámaras	18 cámaras	

Tabla 15: Frecuencia de transmisión para los nodos que simulan ser cámaras en la Prueba 2.

A continuación incluimos una tabla con la presentación de resultados de las 4 etapas mencionadas anteriormente. Los nodos al igual que en la etapa anterior se configuraron con un DR de valor 3.

ETAPA	MODELO	CANTIDAD DE NODOS (emulados)	CANTIDAD DE CÁMARAS	PAQUETES ENVIADOS	PAQUETES RECIBIDOS	EFFECTIVIDAD DE LA RED
2.1	Agrícola	239	9	451	440	97.6%
2.2	Agrícola	241	11	516	495	95.9%
2.3	Agrícola	248	18	747	716	95.9%
2.4	Agrícola	368	11	597	566	94.8%

Tabla 16: Resultados de la Prueba 2.



Figura 60: Resultados generales etapa 2.1.



Figura 61: Resultados generales etapa 2.2.



Figura 62: Resultados generales etapa 2.3.



Figura 63: Resultados generales etapa 2.4.

En resumen de la experiencia, se observa que no hay grandes variaciones en la calidad de comunicación ante un leve aumento de cámaras en la red. Sin embargo, sí hay gran afectación si se agregan más dispositivos.

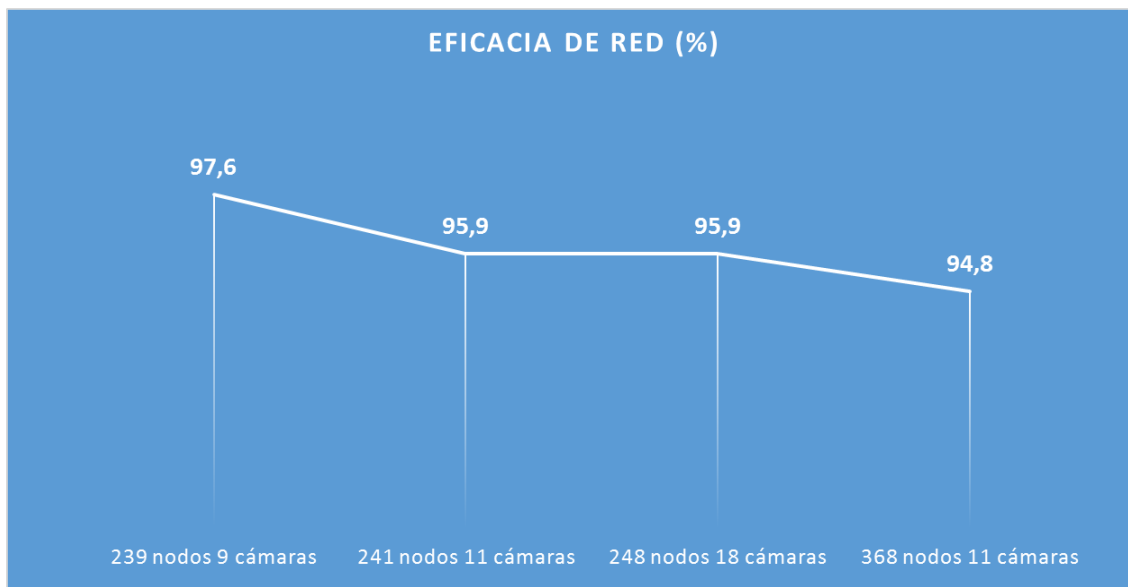


Gráfico 2: Eficacia de red en función de número de nodos y cámaras.

8.3. Resolución de limitantes del proyecto

La primera limitante presentada en la elección del Hardware, tuvo que ver con la relación entre Alcance-Consumo-Costos. En particular, al ser una aplicación agroindustrial, el alcance cumple un factor fundamental. En este sentido, se toma la elección por un dispositivo final y un Gateway acordes para esta condición.

En cuanto al costo, se vio sumamente influenciado por el tiempo disponible para el desarrollo del nodo y los plazos de entrega propuestos por los proveedores. El costo puede disminuir, si se logran plazos de entrega menores y se dispone de mayor tiempo para el desarrollo integral del dispositivo. La decisión que pudo resolver este punto, fue ajustar el número de nodos al presupuesto, sin perder el objetivo de tener número significativo de nodos físicos conectados a la red.

Vale la pena aclarar que los equipos adquiridos fabricados por Pycom, tanto los Lopy4, como los Fipy, los Pysense y los Pytrack, presentaron varias limitantes a la hora de configurarlos ya que requieren del uso de programas como Visual Studio Code o Atom, los cuales nunca habíamos utilizado. En nuestro caso utilizamos

Visual Studio Code pero tuvimos que pasar por un proceso de adaptación al mismo bajando las extensiones necesarias para el uso de Python y de los dispositivos Pycom.

Una vez que nos familiarizamos con el uso de Visual Studio Code nos encontramos con varios problemas a la hora de conectar con los dispositivos, tanto para restaurarlos en los casos en los que tenían una configuración previa como para agregarles un programa nuevo o las librerías necesarias para que el programa funcione.

No se encontraron estudios de modelos de este tipo, por lo que fue muy oportuno el abordaje desde el inicio, realizando un estudio de necesidades a nivel local para luego presentar un modelo a medida de la realidad que presentan los negocios agroindustriales en Uruguay. Encontramos grandes carencias de conocimiento personal sobre el tema, el cual se presentó como una gran fuente de nuevos conocimientos pero con un gran desafío por delante para comprenderlos y llevarlos a un modelo adecuado. Sin lugar a dudas, llevar estas ideas y nuevas posibilidades tecnológicas a los productores, resultará en nuevos modelos de mejor performance y con mayor proyección a futuro.

CAPÍTULO 9

Conclusiones

En general se alcanzó el objetivo del proyecto, se modeló una red LoRa aplicable a un predio rural de tamaño medio en Uruguay y se plantearon características que la red debía cumplir. Luego se realizaron las pruebas necesarias para probar que esa red se puede implementar, cumpliendo con las características planteadas. Para ello se utilizó primero un solo nodo y luego una cantidad de nodos que permitió emular una red del tamaño necesario según el modelo.

Una vez realizadas todas las pruebas podemos concluir que los resultados son razonables y que el modelo planteado en el capítulo 2 es realizable, brindando soluciones a las necesidades planteadas en ese mismo capítulo, simplificando tareas, lo cual permite una mayor eficiencia en las actividades del sector agropecuario y mejorando procesos que hoy en día se llevan a cabo. Todo esto además bajando los costos en algunos casos, como puede ser en la monitorización del ganado donde la disminución de costos es significativa ya que el precio del producto es más barato y dada la cantidad de dispositivos finales necesaria la diferencia es más notoria aún.

Para afirmar que es realizable nos basamos en que los requerimientos planteados en el capítulo 3 son alcanzables: con respecto al consumo de energía propusimos un modelo en el que se asegure que las baterías no se tengan que recargar a

menos de seis meses, lo cual se comprobó que es posible ya que en las pruebas obtuvimos como resultado que no sería necesario recargar las baterías en casi un año.

El alcance en la comunicación como se mencionó anteriormente también supera el mínimo requerido de 4 km llegando a los 5,5 km.

La confiabilidad en las pruebas con nodo único no fue la esperada pero como se menciona en el capítulo 8.1.4 las condiciones en las que la prueba fue realizada no fueron óptimas para medir este parámetro, en cambio en las pruebas con múltiples nodos obtuvimos un porcentaje de pérdida de paquetes mucho menor por lo que consideramos que es posible mejorar este parámetro en condiciones normales de un establecimiento rural.

Analizando las pruebas con múltiples nodos observamos que los resultados cumplen las expectativas y son incluso mejor de lo esperado en algunos casos, con lo cual podemos afirmar que es posible implementar modelos con múltiples nodos que cumplan distintas funciones. Esto nos parece importante de recalcar ya que brinda un abanico de posibilidades muy grande ante las variadas necesidades que se encuentran hoy en día en la industria analizada en este proyecto, no solo para los tres modelos considerados sino que se podría considerar su aplicación en otros modelos que puedan surgir.

A nivel personal estamos muy conformes con las pruebas realizadas y con el haber alcanzado los objetivos planteados, para lo cual trabajamos a lo largo de la realización de este proyecto. Nos pareció un tema muy interesante, tanto la tecnología a aplicar como el negocio a analizar ya que fueron temas que ninguno de nosotros conocía en profundidad antes de este trabajo final de grado.

Es por todo lo mencionado anteriormente que como conclusión global consideramos el proyecto una experiencia positiva y una investigación con resultados prometedores sobre la que se puede seguir trabajando para lograr un producto que beneficie ampliamente a la agroindustria.

ANEXO A

PYTRACK

A continuación incluiremos el código implementado en los dispositivos pytrack con su correspondiente diagrama de flujo. Los valores de `app_eui`, `app_key` y `dev_eui` que se ven en este código son de un dispositivo final puntual del que tomamos el código para el ejemplo, esos valores se cambian en cada uno de los dispositivos. El tiempo de `sleep` también varía en los diferentes nodos y las diferentes pruebas, este es un caso puntual:


```

from network import LoRa
import socket
import time
import ubinascii
import pycom
import struct
import network
import os
import utime
import gc
from L76GNSS import L76GNSS
from pycoproc_1 import Pycoproc

py = Pycoproc (Pycoproc.PYTRACK)
l76 = L76GNSS(py, timeout=30)

# Se deshabilita el led que prende y apaga en azul
pycom.heartbeat(False)

# Se inicializa LoRa en el modo LoRaWAN y se selecciona la frecuencia
# correspondiente a Uruguay

lora = LoRa(mode=LoRa.LORAWAN, region=LoRa.US915)

# se ingresan los parámetros para la autenticación de la Over The Air Activation (OTAA),
# los mismos coinciden con los ingresados en TTN

app_eui = ubinascii.unhexlify('0000000000000035')
app_key = ubinascii.unhexlify('CF472BC688AF0FC2D24043149D66CA81')
dev_eui = ubinascii.unhexlify('70b3d54993d35b1d')

#Se eliminan los canales del 0 al 72
for i in range(0,8):
    lora.remove_channel(i)
for i in range(16,65):
    lora.remove_channel(i)
for i in range(66,72):
    lora.remove_channel(i)

# Se configura la conexión con la red OTA
lora.join(activation=LoRa.OTAA, auth=(dev_eui, app_eui, app_key), timeout=0)

# Esperamos a que el nodo se una a la red
while not lora.has_joined():
    pycom.rgbled(0x0A0A08) # white
    time.sleep(2.5)
    print('Not yet joined...')

# El nodo se une a la red y se prende el led en verde
print('Joined LoRa network')
pycom.rgbled(0x00CC00) # green

# Se crea el socket LoRa
s = socket.socket(socket.AF_LORA, socket.SOCK_RAW)

# Se configura la tasa de transmisión de datos de LoRa
s.setsockopt(socket.SOL_LORA, socket.SO_DR, 3)

# Se inicializa la variable contador que cuenta la cantidad de paquetes enviados
contador = 0

```

```

#Inicia un loop en el que se envía información cada un tiempo determinado
while True:
    # se configura el socket para que se bloquee (que espere que se mande la información
    # y luego las dos ventanas de recepción - Clase A)
    s.setblocking(True)

    # se prende el led en rosa indicando que se está enviando la información
    pycom.rgbled(0xFF3399) #pink

    # se guarda en la variable coord las coordenadas obtenidas por el nodo
    coord = l76.coordinates()

    #el contador suma un paquete
    contador = (contador + 1)

    print('Coordenadas:', coord )
    print('Numero de paquetes', contador )

    # como mientras el dispositivo establece conexión con el satellite manda coordenadas
    # vacías, utilizamos un if para que en caso de que haya información de coordenadas las
    # mande, de otro modo manda las coordenadas (0,0).
    if coord[0] != None:

        #se guarda la latitud en la variable lat y la longitud en la variable long
        lat = int(coord[0]*(-100))
        long = int(coord[1]*(-100))

        print (lat)
        print (long)

        # se guardan las variables lat, long y contador en una variable data como un bytearray
        data = bytearray(struct.pack('h',lat)+struct.pack('h',long)+struct.pack('h',contador))

        print('Sending data (uplink)...')

        # envía la información
        s.send(data)

        # desbloquea el socket
        s.setblocking(False)

        print('Data Sent: ', data)
    else:
        nolat = 00
        nolong = 00

        data = bytearray(struct.pack('h',nolat)+struct.pack('h',nolong)+struct.pack('h',contador))

        print('Sending data (uplink)...')

        # envía la información
        s.send(data)

        # desbloquea el socket
        s.setblocking(False)

        print('Data Sent: ', data)

    # Entra en modo sleep por 20 segundos y el led se pone en verde, luego vuelve a comenzar el loop
    pycom.rgbled(0x00CC00) # green
    time.sleep(20)

```

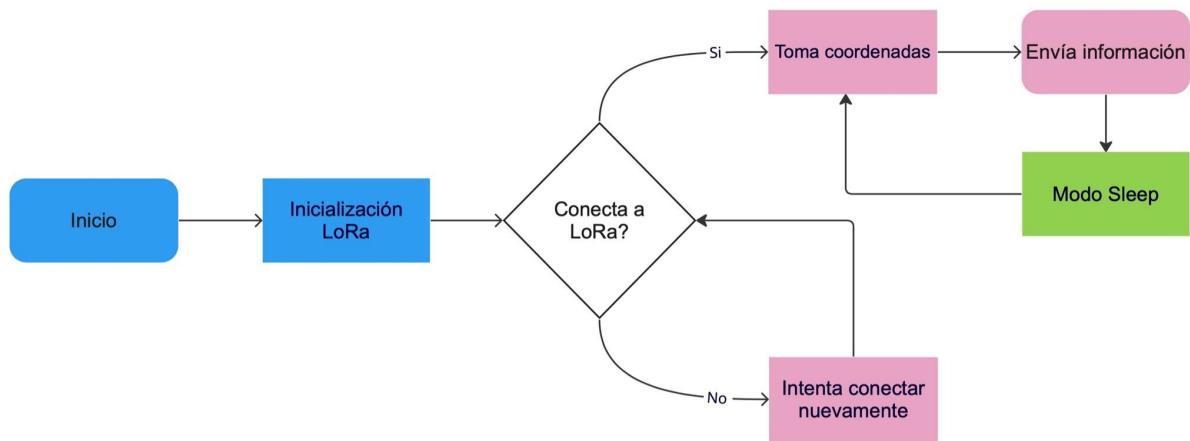


Figura 64: Diagrama de flujo dispositivos finales con módulo Pytrack.

ANEXO B

PYSENSE

A continuación incluiremos el código implementado en los dispositivos Pysense con su correspondiente diagrama de flujo. Los valores de `app_eui`, `app_key` y `dev_eui` que se ven en este código son de un dispositivo final puntual del que tomamos el código para el ejemplo, esos valores se cambian en cada uno de los dispositivos. El tiempo de `sleep` también varía en los diferentes nodos y las diferentes pruebas, este es un caso puntual:

```

from network import LoRa
import socket
import time
import ubinascii
import binascii
import pycom
import struct
import math as m

from pysense import Pysense
from SI7006A20 import SI7006A20
from MPL3115A2 import MPL3115A2, ALTITUDE, PRESSURE

py = Pysense()
si = SI7006A20(py)
mpPress = MPL3115A2(py,mode=PRESSURE)

# Se deshabilita el led que prende y apaga en azul
pycom.heartbeat(False)

# Se inicializa LoRa en el modo LoRaWAN y se selecciona la frecuencia
# correspondiente a Uruguay

lora = LoRa(mode=LoRa.LORAWAN, region=LoRa.US915)

# se ingresan los parámetros para la autenticación de la Over The Air Activation (OTAA),
# los mismos coinciden con los ingresados en TTN
app_eui = ubinascii.unhexlify('00000000000020')
app_key = ubinascii.unhexlify('F8AB1A80963723DC3CD77F506B2DE151')
dev_eui = ubinascii.unhexlify('70b3d549944868bf')

#Se eliminan los canales del 0 al 72
for i in range(0,8):
    lora.remove_channel(i)
for i in range(16,65):
    lora.remove_channel(i)
for i in range(66,72):
    lora.remove_channel(i)

# Se configura la conexión con la red OTA
lora.join(activation=LoRa.OTAA, auth=(dev_eui, app_eui, app_key), timeout=0)

# Esperamos a que el nodo se una a la red
while not lora.has_joined():
    pycom.rgbled(0x0A0A08) # white
    time.sleep(2.5)
    print('Not yet joined...')

# El nodo se une a la red y se prende el led en verde
print('Joined LoRa network')
pycom.rgbled(0x00CC00) # green

# Se crea el socket LoRa
s = socket.socket(socket.AF_LORA, socket.SOCK_RAW)

# Se configura la tasa de transmisión de datos de LoRa
s.setsockopt(socket.SOL_LORA, socket.SO_DR, 3)

# Se inicializa la variable contador que cuenta la cantidad de paquetes enviados
contador = 0

```

```

#Inicia un loop en el que se envía información cada un tiempo determinado
while True:
    # se configura el socket para que se bloquee (que espere que se mande la información
    # y luego las dos ventanas de recepción - Clase A)
    s.setblocking(True)

    # se prende el led en rosa indicando que se está enviando la información
    pycom.rgbled(0xFF3399) #pink

    #se guarda en las variables temperature, humidity y pressure las coordenadas obtenidas por el nodo
    temperature = int(si.temperature()*100)
    humidity = int(si.humidity()*100)
    pressure = int(mpPress.pressure()/100)

    #el contador suma un paquete
    contador = (contador + 1)

    print('Temperature:', temperature/100 )
    print('Humidity:', humidity/100)
    print('Pressure:', pressure)
    print('Numero de paquete', contador)

    # se guardan las variables temperature, humidity, pressure y contador en una variable data como un bytearray
    data = bytearray(struct.pack('h',temperature)+struct.pack('h',humidity)+struct.pack('h',pressure)+struct.pack('h',contador))

    print('Sending data (uplink)...')

    # envía la información
    s.send(data)

    # desbloquea el socket
    s.setblocking(False)

    print('Data Sent: ', data)

    # Entra en modo sleep por 20 segundos y el led se pone en verde, luego vuelve a comenzar el loop
    pycom.rgbled(0x00CC00) # green
    time.sleep(120)

```

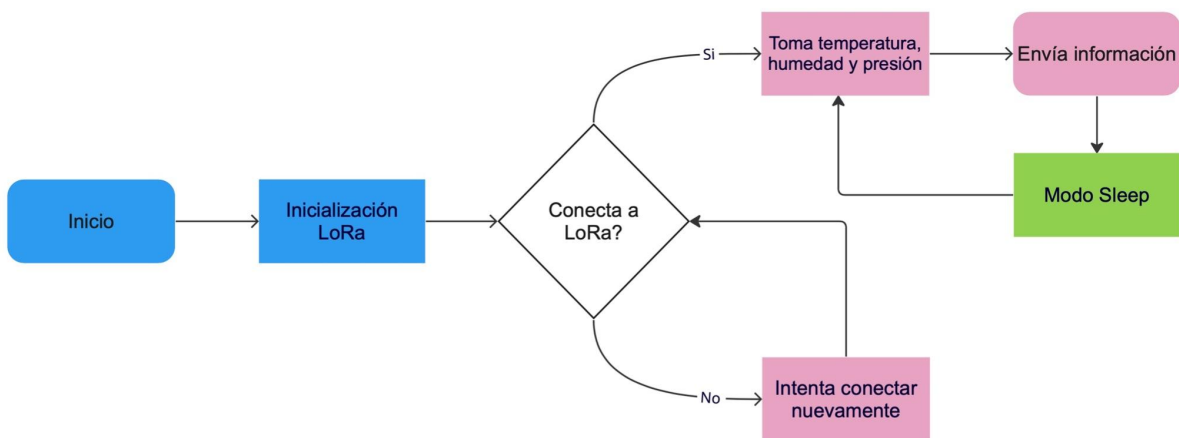


Figura 65: Diagrama de flujo dispositivos finales con módulo Pysense.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Q. M. Quadir, T. A. Rashid, N. K. Al-Salihi, B. Ismael, A. A. Kist, and Z. Zhang, "Low power wide area networks: A survey of enabling technologies, applications and interoperability needs", IEEE Access, vol. 6, pp. 77454–77473, 2018.

[2] Home Page, LoRa Alliance [Online]. Disponible: <https://lora-alliance.org/>. Accedida en: 26/10/2022.

[3] B. Bellini, A. Amaud, "A 5 μ A wireless platform for cattle heat detection", 2017 IEEE 8th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS), 2017.

[4] M. Miguez, M. Marioni, M. Ortiz, G. Vogel and A. Arnaud, "An IoT-based electronic price-tag for food retail", 26th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), pp. 189-192, 2019.

[5] G. Baldo, J. Correa, F. Rodriguez, "Telemetría de luminaria en aeropuertos utilizando LoRaWAN", Proyecto Fin de Carrera, Ingeniería en Electrónica, 2020.

[6] J. P. Shanmuga Sundaram, W. Du and Z. Zhao, "A Survey on LoRa Networking: Research Problems, Current Solutions, and Open Issues", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22-1, pp. 371-388, 2020.

[7] Repositorio Colibri, UDELAR [Online]. Disponible en: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/simple-search?query=iot>. Accedida en: 26/10/2022.

[8] Lozano Chirigliano, Gonzalo Martín, "Diseño de antena para payload IoT de satélite", UCUDAL, [Online]. Disponible en: <https://liberi.ucu.edu.uy/xmlui/handle/10895/462/discover?query=iot&submit=>. Accedida en: 26/10/2022.

[9] Barquet, Diego, Frechero, Joaquín, "Red de sensado inalámbrico para riego en frutihorticultura", [Online]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10895/1625>. Accedida en: 26/10/2022.

[10] Gutierrez, Fica, Alejandro, Pedro, "Diseño e implementación de una red inalámbrica para monitores de productos agrícolas basado en el internet de las cosas", Universidad del Bio Bio CHILE 2019 [Online]. Disponible en: http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/3434/1/Fica_Guti%C3%A9rrez_Pedro_Alejandro.pdf. Accedida en: 26/10/2022.

[11] Pérez, Daniel, and Redy Risc. "Implementación de Lora Y Lorawan Como Escenario Futuro de La Industrias 4.0 En El Sector Agroindustrial Peruano." Campus, vol. 25, no. 29, 30 Dec. 2019, pp. 133–147, 10.24265/campus.2020.v25n29.10, [Online]. Disponible en: <https://www.usmp.edu.pe/campus/pdf/revista29/articulo10.pdf>. Accedida en: 26/10/2022.

[12] Uruguay XXI, "Exportaciones uruguayas por capítulos", Período 2001 - 2021, [Online]. Disponible en:

<https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/exportacion-es-por-capitulos/>. Accedida en: 26/10/2022.

[13] “El negocio de la lechería mejoró pero siguen cerrando tambos”, semanario LaMañana [Online]. Disponible en: <https://www.xn--lamaana-7za.uy/agro/el-negocio-de-la-lecheria-mejoro-pero-siguen-cerrando-tambos/>. Accedida en: 26/10/2022.

[14]”Control de plagas y enfermedades del trigo”, Blog Agrospray, [Online]. Disponible en: <https://agrospray.com.ar/blog/enfermedades-del-trigo/>. Accedida en: 26/10/2022.

[15] R. Gómez, V. Porcile,” La articulación como estrategia de trabajo en ganadería familiar”, 2020 [Online]. Disponible en: http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?pid=S2301-15482020000301303&script=sci_arttext#B7. Accedida en: 26/10/2022.

[16] Gómez Miller, Raúl, “Adopción de Tecnología en Sistemas Ganaderos del Norte”, 2017, [Online]. Disponible en: http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/st-235_2017.pdf. Accedida en: 26/10/2022.

[17] Página web de INDATA, [Online]. Disponible en: <https://indata.uy/lora/>. Accedida en: 26/10/2022.

[18] Página web de SENSORDATA, [Online].Disponible en: <https://www.sensordata.com.uy/>. Accedida en: 26/10/2022.

[19] Página web de TelLoT, [Online]. Disponible en: <http://www.teliot.io/>. Accedida en: 26/10/2022.

[21] “Redes de sensores inalámbricos para internet de las cosas aplicado a la producción agrícola”, INIA, UDELAR, Agosto 2021 [Online]

. Disponible en:

<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/16039/1/Inia-Fpta-94-proyecto-313-Agosto-2021.pdf>..

[21] Dendrómetro DBV60, ICT International, [Online]. Disponible en:

<https://ictinternational.com/products/dbv60/dbv60-voltage-band-dendrometer/>. Accedida en: 26/10/2022.

[22] Medidor de flujo de savia, Labcontrol, [Online]. Disponible en:

<https://labcontrol.com.br/medidor-de-fluxo-de-seiva-modelo-sfm1/>.

Accedida en: 26/10/2022.

[23] Programa Nacional de Investigación en Producción de Leche, INIA, [Online]. Disponible en:

<http://www.inia.uy/investigaci%C3%B3n-e-innovaci%C3%B3n/programas-nacionales-de-investigaci%C3%B3n/Programa-Nacional-de-Investigaci%C3%B3n-en-Producci%C3%B3n-de-Leche/Antecedentes#:~:text=Si%20bien%20existe%20un%20amplio.concentrado%20energ%C3%A9tico%20y%20forrajes%20conservados>. Accedida en: 26/10/2022.

[24] Suárez Rodríguez, Jairo, “Estudio del comportamiento de la tecnología LoRa en entornos urbanos”, [Online]. Disponible en:

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/24050/439633.pdf?sequence=1>. Accedida en: 26/10/2022.

[25] Minerva, Roberto, Biru Abyi, Rotond Domenico, “Towards a Definition of the Internet of Things”, 2015 IEEE, [Online]. Disponible en:

https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf. Accedida en: 26/10/2022.

[26] “What is LoRa?”, Semtech, [Online]. Disponible en:

<https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>. Accedida en: 26/10/2022.

[27] Página web de la LoRa Alliance [Online]. Disponible en: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-parameters/>. Accedida en: 26/10/2022.

[28] “Regional Parameters”, The Things Network, [Online]. Disponible en: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-parameters/>. Accedida en: 26/10/2022.

[29] “Spreading Factor”, The Things Network, [Online]. Disponible en: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/spreading-factors/>. Accedida en: 26/10/2022.

[30] “LoRa Link-budget and Sensitivity Calculations – Example Explained”, TechPlayOn, 2017 [Online]. Disponible en: <https://www.techplayon.com/loralink-budget-sensitivity-calculations-example-explained/>. Accedida en: 26/10/2022.

[31] “What is LoRaWAN® Specification”, LoRa Alliance, [Online]. Disponible en: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>. Accedida en: 26/10/2022.

[32] Gemalto, Actility y Semtech, “LoRaWAN Security”, 2017 Lora Alliance, [Online]. Disponible en: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan_security_whitepaper.pdf

[33] “About the LoRaWAN Standards”, LoRa Alliance, [Online]. Disponible en: <https://lora-alliance.org/lorawan-for-developers/>. Accedida en: 26/10/2022.

[34] Bandas libres para aplicaciones ISM, presentación sobre Estándares de Comunicaciones Inalámbricas, Instituto Tecnológico de Querétaro, [Online]. Disponible en: http://www.itq.edu.mx/carreras/IngElectronica/archivos_contenido/Apuntes%20de%20materias/CDF1206_Comm_Movil_Inalamb/4_Estandares_Comunicaciones_Inalamblicas.pdf. Accedida en: 26/10/2022.

[35] “Frequency Plan by Country”, The Things Network, [Online]. Disponible en: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequencies-by-country/>. Accedida en: 26/10/2022.

[36] “Fair Use Policy”, The Things Network, [Online]. Disponible en: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/#maximum-duty-cycle>. Accedida en: 26/10/2022.

[37] Best LoRaWAN Network Servers, IOT Factory, [Online]. Disponible en: <https://iotfactory.eu/products/software-platform/best-lorawan-network-servers/>. Accedida en: 26/10/2022.

[38] “Outdoor LoRaWAN gateway - User Guide”, página de recursos de Milesight [Online]. Disponible en: <https://resource.milesight-iot.com/milesight/document/ug67-user-guide-en.pdf>. Accedida en: 26/10/2022.

[39] Manual de usuario del kit de evaluación EBYTE MBL Series RCE220-400MLB-01, Manuales +, [Online]. Disponible en: <https://manuals.plus/es/ebyte/mb1-series-rce220-400mlb-01-evaluation-kit-manual#axzz7YE2go5Gt>. Accedida en: 26/10/2022.

[40] Radio LoRa Adafruit Module RFM95W 868 MHz, tienda online de Optimus Digital, [Online]. Disponible en: <https://www.optimusdigital.ro/en/lora/2152-radio-lora-adafruit-module-rfm95w-868-mhz.html>. Accedida en: 26/10/2022.

[41] Datasheet LoPy4, documentos de Pycom, [Online]. Disponible en: <https://docs.pycom.io/datasheets/development/lopy4/>. Accedida en: 26/10/2022.

[42] Datasheet FiPy4, documentos de Pycom [Online]. Disponible en: <https://docs.pycom.io/datasheets/development/fipy/>. Accedida en: 26/10/2022.

[43] Pytrack, página web de Pycom, [Online]. Disponible en: <https://pycom.io/product/pytrack-2-0-x/>. Accedida en: 26/10/2022.

[44] Pysense, página web de Pycom, [Online]. Disponible en: <https://pycom.io/product/pysense-2-0-x/>. Accedida en: 26/10/2022.

[45] “Product Details - SX1276 - LoRa Conect™ 137MHz to 1020MHz Long Range Low Power Transceiver”, pagina web de Semtech, [Online]. Disponible en: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276#documentation>. Accedida en: 26/10/2022.

[46] LoRaWANTM Backend Interfaces 1.0 Specification, Lora Alliance, [Online]. Disponible en: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawantm-backend-interfaces-v1.0.pdf>. Accedida en: 26/10/2022.

[47] LoRaWAN airtime calculator, The Things Network, [Online]. Disponible en: <https://www.thethingsnetwork.org/airtime-calculator>. Accedida en: 26/10/2022.

[48] “Update Firmware Over The Air”, documentos de Pycom, [Online]. Disponible en: <https://docs.pycom.io/updatefirmware/ota/>. Accedida en: 26/10/2022.

[49] Últimas versiones de firmware para Lopy4, página de Pycom, [Online]. Disponible en: <https://software.pycom.io/downloads/pygate/LoPy4.html>. Accedida en: 26/10/2022.

