



# **Diseño de una arquitectura de red IoT para la Universidad de los Andes**

**Ramón Alejandro Arias Rivera**

Universidad de los Andes  
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación  
Maestría en Ingeniería de Sistemas y Computación  
Bogotá, Colombia  
2022



# **Diseño de una arquitectura de red IoT para la Universidad de los Andes**

**Ramón Alejandro Arias Rivera**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería de Sistemas y Computación**

Director:

PhD. Carlos Andrés Lozano Garzón

Línea de Investigación:

Diseño y Arquitecturas de Redes de Próxima Generación

Grupo de Investigación:

COMIT

Universidad de los Andes

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación

Maestría en Ingeniería de Sistemas y Computación

Bogotá, Colombia

2022



## Resumen

Este documento propone una arquitectura de red para soportar servicios de IoT en un *Smart Campus*, utilizando LoRa como protocolo de comunicación. El proyecto surge como apoyo al *Programa de Desarrollo Integral* (PDI), propuesto por la Universidad de los Andes, que busca una transformación digital del campus universitario y la adaptación de los servicios educativos a los entornos virtuales. En este trabajo, se expone la metodología utilizada para el diseño de la red IoT, las distintas métricas escogidas para su planeación y la propuesta de la arquitectura de red IoT. También, para corroborar el comportamiento de la red, se llevó a cabo la implementación de un prototipo de su despliegue para dos escenarios distintos: (i) sensores estacionarios y (ii) sensores móviles. Los resultados obtenidos en los dos escenarios de prueba fueron satisfactorios permitiendo una obtención de los datos obtenidos por los sensores.

**Palabras clave:** IoT, LoRA, Smart Campus

## **Abstract**

This paper proposes a network architecture to support IoT services in a Smart Campus, using LoRa as communication protocol. The project arises as support for the Integral Development Program (PDI), proposed by the Universidad de los Andes, which seeks a digital transformation of the university campus and the adaptation of educational services to virtual environments. In this work, the methodology used for the design of the IoT network, the different metrics chosen for its planning and the proposal of the IoT network architecture are presented. Also, to corroborate the behavior of the network, a prototype of its deployment was implemented for two different scenarios: (i) stationary sensors and (ii) mobile sensors. The results obtained in the two test scenarios were satisfactory, allowing the data obtained by the sensors to be obtained.

Translated with [www.DeepL.com/Translator](http://www.DeepL.com/Translator) (free version)

**Keywords:** IoT, LoRA, Smart Campus,

# Contenido

	Pág.
<b>1. Introducción .....</b>	<b>XI</b>
<b>2. Generalidades .....</b>	<b>XIII</b>
2.1 Marco teórico .....	XIII
2.1.1 Internet de las Cosas .....	XIII
1.1.2 Smart Campus .....	XIV
1.1.3 <i>Long Range</i> (LoRa) .....	XV
2.2 Estado del arte .....	XVI
2.3 Definición del problema .....	XIX
2.4 Justificación .....	XXI
2.5 Objetivos .....	XXII
2.6 Metodología .....	XXIII
<b>3. Identificación de tráfico de la red .....</b>	<b>XXV</b>
3.1 Plan de capacidad .....	XXV
3.2 Características fundamentales de la red .....	XXVII
<b>4. Diseño de la arquitectura de la red .....</b>	<b>XXIX</b>
4.1 Arquitectura de la red .....	XXIX
4.2 Diseño de la red .....	XXXI
4.3 Métricas de Modelamiento de la red .....	XXXIV
<b>5. Implementación del prototipo de la red y sistemas de monitoreo .....</b>	<b>XXXIX</b>
5.1 Implementación de prototipo de la red .....	XXXIX
5.2 Análisis de los resultados obtenidos .....	XLIV
<b>6. Conclusiones y trabajo a futuro .....</b>	<b>47</b>
6.1 Conclusiones .....	47
6.2 Trabajo a futuro .....	47

## Lista de ilustraciones

	<b>Pág.</b>
<b>Ilustración 1 Crecimiento de los dispositivos conectados [8].</b> .....	<b>XIV</b>
<b>Ilustración 2 Arquitectura de <i>Smart Campus</i> Universidad Panamericana [9].</b> .....	<b>XV</b>
<b>Ilustración 3 Arquitectura LoRa [10].</b> .....	<b>XVI</b>
<b>Ilustración 4 Arquitectura utilizada en la Universidad de La Coruña [3].</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>Ilustración 5 Topología de la red Universidad de Linnaeus [12].</b> .....	<b>XIX</b>
<b>Ilustración 6 Iniciativas del PDI de la Universidad de los Andes 2021-2026 [13].</b> ...	<b>XXII</b>
<b>Ilustración 7 Arquitectura de la red</b> .....	<b>XXX</b>
<b>Ilustración 8 Configuración Gateway LoRa.</b> .....	<b>XL</b>
<b>Ilustración 9 Modo de funcionamiento del Gateway LoRa.</b> .....	<b>XL</b>
<b>Ilustración 10 Nodo LoRa de la red.</b> .....	<b>XLI</b>
<b>Ilustración 11 Servicios desplegados en las máquinas virtuales.</b> .....	<b>XLI</b>
<b>Ilustración 12 Diagrama de comunicación de los sensores.</b> .....	<b>XLII</b>
<b>Ilustración 13 Datos de los sensores expuestos por el API.</b> .....	<b>XLII</b>
<b>Ilustración 14 Panel de control de Chirpstack.</b> .....	<b>XLIII</b>
<b>Ilustración 15 Datos LoRA detectados por el <i>Gateway</i>.</b> .....	<b>XLIII</b>
<b>Ilustración 16 Datos enviados corruptos.</b> .....	<b>XLIV</b>



## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Estadísticas de uso de internet mundial [7].	XIII
Tabla 2 Universidad que ya han implementado Smart Campus [3]	XVII
Tabla 3 Población estudiantil [4]	XX
Tabla 4 Comparación entre protocolos IoT [5].	XXI
Tabla 5 Cantidad de puntos posibles.	XXVI
Tabla 6 Ancho de banda requerido por edificio.	XXVII
Tabla 7 Cantidad de Gateways por Edificio.	XXXIII
Tabla 8 Distribución de Gateways por piso.	XXXIV



## Introducción

El internet de las cosas (IoT - por sus siglas en inglés) se refiere a la capacidad de interconectar la mayor cantidad de dispositivos de uso cotidiano, bajo el objetivo de compartir datos entre ellos, así como con distintas redes de comunicación, y crear su propio ambiente [1]. En 2019, se registraron 7,74 mil millones de dispositivos que cuentan con la capacidad de conectarse a internet (incluyendo celulares, televisores, relojes, entre otros). Para el 2030, se estima que esa cifra aumente hasta los 25,44 mil millones de dispositivos conectados [2]. Gracias a la creciente cantidad de dispositivos conectados a internet, el IoT se ha establecido como una solución plausible a las principales problemáticas de tendencia mundial. De igual forma, como resultado de su versatilidad para adaptarse a los entornos, los dispositivos IoT han permitido la creación de nuevas líneas de aplicación.

Una de las líneas de aplicación que los sistemas IoT han ayudado a propiciar son las *Smart Cities*. Mediante el aprovechamiento de las nuevas tecnologías de la información y comunicación, las ciudades inteligentes tienen como finalidad garantizar una mejoría en: (a) los procesos de toma de decisiones públicas, (b) la calidad de vida de la ciudadanía y (c) en el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible. A partir de esta línea de acción, surge el concepto de los *Smart Campus*, en un espacio controlado permitiendo aplicarlo a universidades. En los *Smart Campus*, las diferentes comunidades están conformadas por estudiantes, docentes y administrativos, sobre quienes se almacenan, manejan y analizan los datos obtenidos a través de los dispositivos pertenecientes al entorno del *Smart Campus* [1]. Actualmente, se estima que en el mundo existen 20 universidades que han implementado soluciones para poder convertirse en un *Smart Campus* [3]. Dentro de las soluciones más comunes realizadas por estos centros universitarios, se destaca la implementación de los sistemas de monitoreo de variables,

tales como: consumo energético, humedad del ambiente, concentración del dióxido de carbono y acceso a laboratorios. Con base en los datos obtenidos por los sensores de monitoreo instalados, las universidades han logrado implementar soluciones efectivas que permiten la interconexión de distintos dispositivos, los cuales posibilitan la toma de decisiones destinadas a resolver las necesidades particulares de la comunidad universitaria.

Las soluciones implementadas por las universidades surgen por el uso de las nuevas tecnologías de información y comunicación. El uso de las TIC le permite a las universidades disponer de información para la toma de decisiones, las cuales se adaptan a las diferentes condiciones que se presentan en sus respectivos entornos universitarios.

En la actualidad, según el alcance de la red, los dispositivos IoT cuentan con diferentes protocolos que les permiten comunicarse entre sí. Así, los principales protocolos que se han utilizado para redes IoT son: LoRa (redes de área amplia y redes de área local), zigbee (redes de área local y redes de área personal), SigFox (redes de área local), entre otros. Dichas tecnologías, mencionadas anteriormente, están diseñadas para cumplir un fin específico en la comunicación de los dispositivos [1].

En este contexto, el proyecto de grado propone el diseño de una arquitectura de red IoT para la Universidad de los Andes que, por un lado, cubra la mayor cantidad de área posible del campus universitario y, por el otro, permita la adecuada conectividad de los sensores conectados a la red. En adición, tomando como punto de partida un plan de capacidad desarrollado con los parámetros de un prototipo funcional de la red IoT, se expone el modelamiento de los parámetros seleccionados para la red, así como los motivos de su escogencia.

# Generalidades

## 1.1 Marco teórico

Con el propósito de contextualizar los conceptos más relevantes utilizados en esta tesis, se presenta una recopilación de antecedentes que permiten una comprensión robusta de la problemática. Para el caso estudiado, se abordan los conceptos de *Internet de las cosas* (IoT), *Smart Campus* y *Long Range* (LoRa).

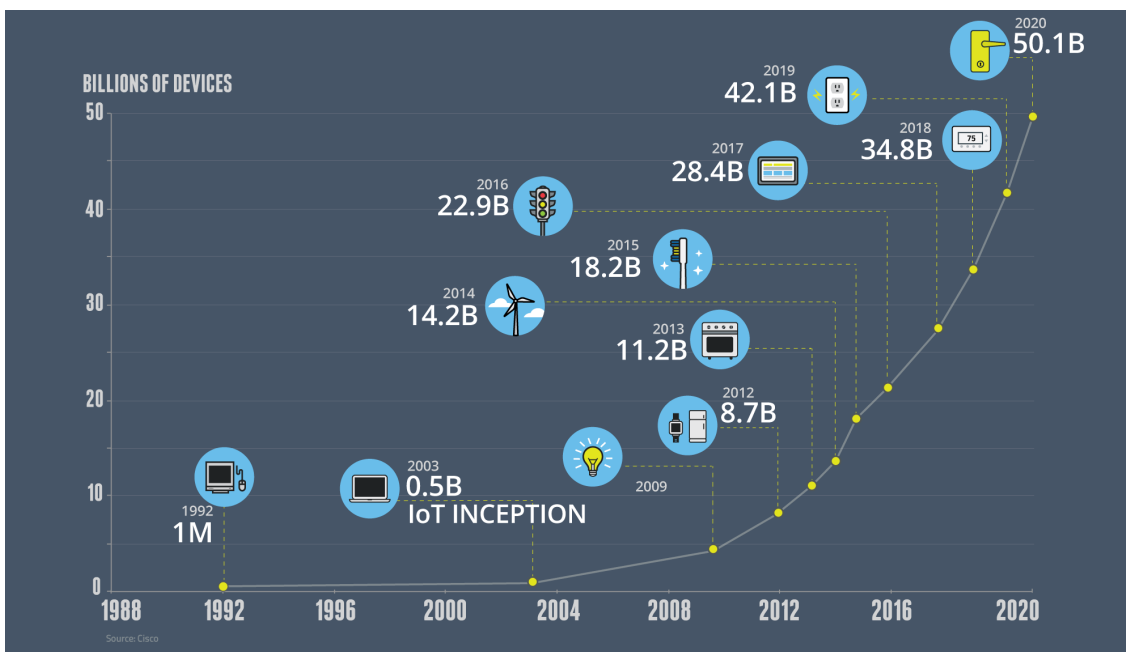
### 2.1.1 Internet de las Cosas

El término *Internet de las cosas* (IoT) se define como un paradigma de sistemas distribuidos, donde sensores y actuadores están conectados, a través de canales de comunicación, a una red de Internet mucho más grande con la finalidad de ayudar a observar, vigilar y controlar sistemas físicos [6]. Durante la última década, este concepto ha estado en un auge constante, gracias a la facilidad con la que los objetos físicos cotidianos (televisores, microondas, neveras, entre otros) pueden conectarse a internet. Así como se muestra en las estadísticas de la *Tabla 1*, se estima que el 66% de la población actual posee al menos un dispositivo conectado a internet que, principalmente, son equipos como celulares o televisores.

Regiones del mundo	Población	% de la población mundial	Usuarios de internet al 31 de diciembre	Tasa de penetración (% pobl)	Crecimiento 2000-2022	% internet mundial
África	1.349.588.547	17,1%	601.327.461	45%	13220%	11,50%
Asia	4.350.826.899	55,1%	2.790.150.527	64%	2341%	53,10%
Europa	841.319.704	10,7%	743.602.636	88%	608%	14,20%
América Latina y el Caribe	663.520.324	8,4%	533.171.730	80%	2851%	10,10%
América del Norte	372.555.585	4,7%	347.916.694	93%	222%	6,60%
Medio Oeste	268.302.801	3,4%	205.019.130	76%	6141%	3,90%
Oceanía/Australia	43.602.955	0,6%	30.549.185	70%	301%	0,60%
Total	7.889.716.815	100,0%	5.251.737.363	67%	1355%	100,00%

**Tabla 1 Estadísticas de uso de internet mundial [7].**

Así mismo, este paradigma ha potenciado su crecimiento dado que, también, se ha incrementado el número de dispositivos que han salido al mercado de la mano de la tecnología 5G. Para ilustrarlo, la *Ilustración 1* enseña el crecimiento exponencial que han tenido estos dispositivos. En el año 2020, había, aproximadamente, 50.1 mil millones de dispositivos conectados alrededor del mundo, lo cual duplicó el número de dispositivos conectados en 2016. Por estas razones, se demuestra la tendencia actual encaminada a la migración hacia dispositivos IoT.



**Ilustración 1 Crecimiento de los dispositivos conectados [8].**

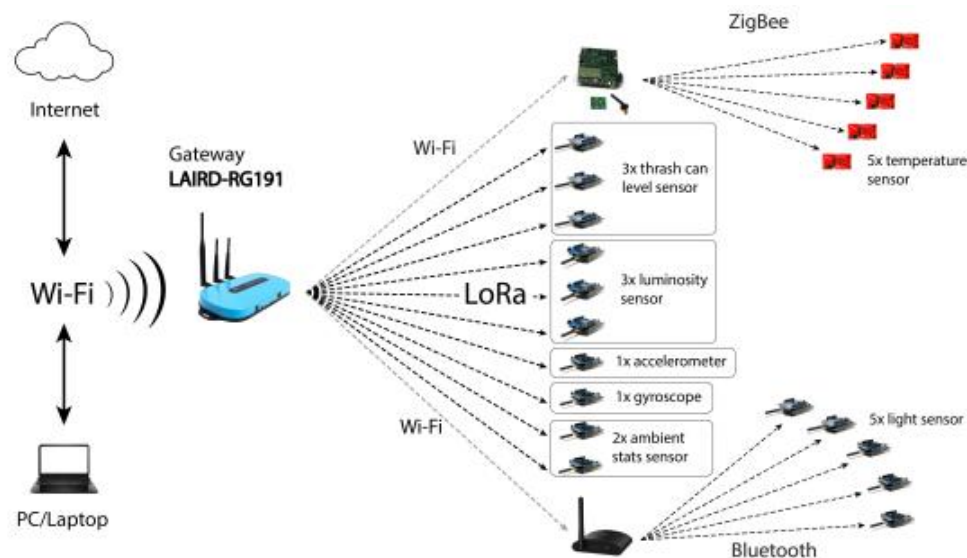
### 1.1.2 Smart Campus

La construcción de campus inteligentes, *Smart Campus* o *Smart Universities* se ha convertido en uno de los principales temas de estudio durante los últimos años. En 2011, la iniciativa *Smart Campus Project*, propuesta por el gobierno surcoreano y la Universidad Yonsei, aumentó la relevancia de los campus inteligentes ya que impulsaba una nueva pedagogía innovadora que permitía una enseñanza enfocada primordialmente en la utilización de recursos tecnológicos [1]. En este trabajo, se define *Smart Campus* como un nuevo paradigma que pretende abarcar —mas no limitar— temáticas como, por ejemplo,

el aprendizaje electrónico, las redes sociales y la sostenibilidad ecológica, en conexión con los sistemas de gestión de sensores inteligentes [1].

De acuerdo con [3], en la actualidad, existen 20 universidades que han optado por el despliegue de un *Smart Campus*; en su mayoría, estas universidades se encuentran ubicadas en Estados Unidos, China y España [3].

La *Ilustración 2* muestra la arquitectura de un *Smart Campus*, propuesta por la Universidad Panamericana (Guadalajara, México), que se destaca por la inclusión de sensores inteligentes para la gestión de los recursos, así como por la identificación de las funcionalidades específicas que cumple dicho sensor [9].

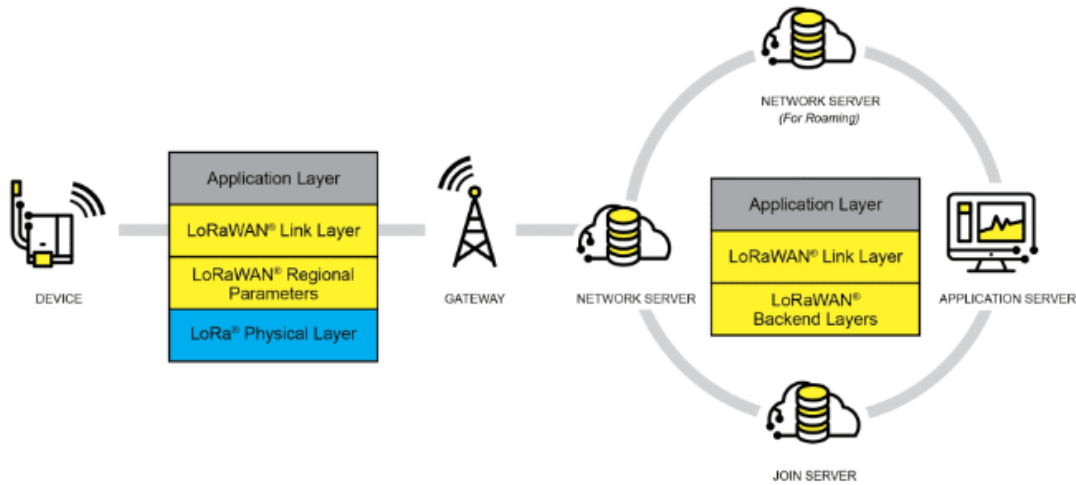


**Ilustración 2** Arquitectura de *Smart Campus* Universidad Panamericana [9].

### 1.1.3 Long Range (LoRa)

*Long Range* (LoRa) es una tecnología de comunicación inalámbrica de baja potencia diseñada con la finalidad de tener un bajo consumo energético por parte de los sensores. LoRa cuenta con un alcance de 20 km de distancia en línea de visión y, además, cada *Gateway* tiene la capacidad para soportar hasta 100 dispositivos conectados simultáneamente [10]. Por ende, admite un gran espacio de alcance entre los sensores con el Gateway.

Por su parte, la *Ilustración 3* presenta la arquitectura básica de LoRa, la cual está compuesta, principalmente, de un *Gateway* que, de un lado, permite la conexión con los dispositivos finales y, a su vez, se conecta con un servidor de red que almacena y escanea los datos para facilitar la presentación de los resultados ante el usuario.



**Ilustración 3 Arquitectura LoRa [10].**

## 1.2 Estado del arte

Como se ha mencionado anteriormente, y tal como se muestra en la *Tabla 2*, 20 universidades ya han implementado soluciones de *Smart Campus* y, específicamente, hay tres que han utilizado arquitecturas basadas en tecnología LoRa.

Smart campus	País	Tecnología usada
[22]	China	WIFI
[23]	China	MESH WIFI
Campus de Ottawa y APEC	Canadá	WIFI
Campus IISc	India	radios Sub-HHZ
Instituto de redes IMDEA	España	WIFI, Bluetooth
Universidad de Birmingham	Reino Unido	WIFI
Universidad de Indonesia	Indonesia	800 MHZ, 2.3 GHZ y 38 GHZ
Universidad de la Coruña	España	LoRaWAN
Universidad de Nashville	Estados Unidos	WIFI

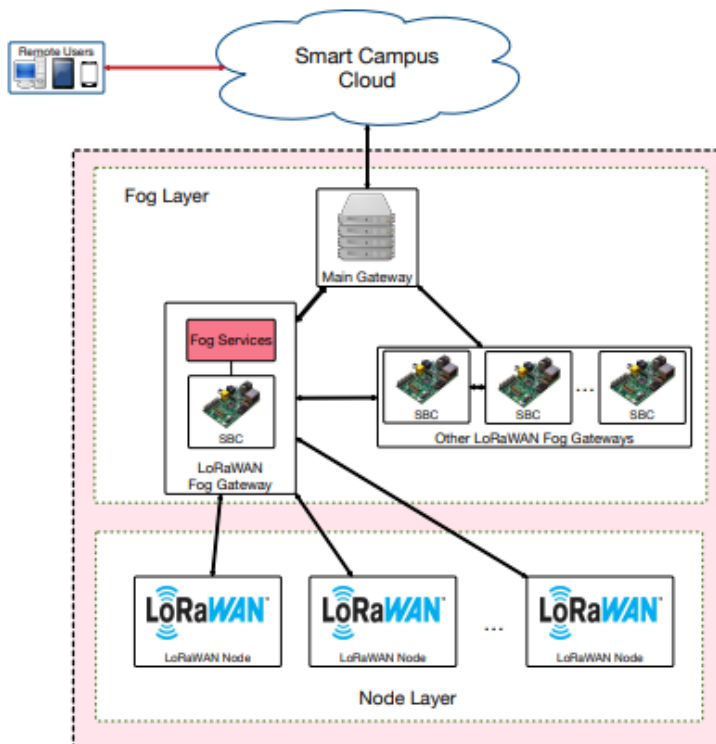


Smart campus	País	Tecnología usada
Universidad de negocios y tecnología	Reino Unido	NFC, RFID
Universidad de Oradea	Rumania	4G,Zigbee
Universidad de Roma	Italia	WIFI
Universidad de Soochow	China	WIFI
Universidad de Washington	Estados Unidos	Zigbee, BLE,6 lowPan
Universidad Politécnica de Madrid	España	WIFI, Ethernet
Universidad Politécnica de Northwester	China	WIFI, Bluetooth
Universidad Tecnológica de Wuhan	China	RFID, cámaras y sensores
Universidad West Texas	Estados Unidos	LoRaWAN,4G/LTE
WiCloud	China	WIFI
WiP	China	3G/4G/5/g, WIFI

**Tabla 2 Universidad que ya han implementado Smart Campus [3]**

La primera Universidad que cuenta con una arquitectura de *Smart Campus* basada en LoRa es la Universidad de La Coruña, España. Esta universidad tiene una arquitectura *Fog*, que permite una escalabilidad de la red en caso de que se necesiten vincular nuevos dispositivos. En este proyecto se han cubierto 26,000 m<sup>2</sup> con el fin de realizar un monitoreo de las variables del entorno, ejecutar un sistema de riego inteligente y realizar un monitoreo del tráfico [3].

Tal como se puede evidenciar en la *Ilustración 4*, la arquitectura utilizada consta de tres capas esenciales: (i) la capa de nodos, donde se localizan los dispositivos de monitoreo creados para el campus; (ii) la capa *Fog*, donde se encuentran, principalmente, los servidores que posibilitan tanto el despliegue propuesto como la comunicación entre los nodos y la tercera capa a través de los *gateways*; y (iii) el *Cloud* del *Smart Campus*, que permite el almacenamiento de datos, así como la comunicación con internet y los diferentes servicios prestados por el campus de la universidad.



**Ilustración 4 Arquitectura utilizada en la Universidad de La Coruña [3]**

La segunda Universidad con un despliegue LoRa es la Universidad West Texas A&M, este despliegue tiene un área de cobertura de aproximadamente 10.39 Km<sup>2</sup> y 42 edificios pertenecientes a su campus universitario. Por una parte, el proyecto se encuentra centrado en el seguimiento de variables de entorno, tales como: temperatura, presión, humedad relativa y concentraciones parciales de oxígeno en los edificios pertenecientes al campus de la universidad. Por otra parte, se vigilan los distintos espacios de la universidad a través de cámaras que funcionan bajo este protocolo [3].

Finalmente, la tercera universidad que ha implementado soluciones de *Smart Campus* con LoRa es la Universidad de Linnaeus en Bélgica. En esta universidad no solo se ha puesto en práctica un sistema de monitoreo de variables de entorno, sino que también se ha activado un sistema de acceso, basado en identificación por radio frecuencia (RFID), utilizando LoRa para la comunicación de los controladores de acceso. Esta propuesta se ha llevado a cabo con la intención de saber qué personas ingresan a cada laboratorio, así como la variación de temperatura cuando se encuentran en las instalaciones.

La *Ilustración 5* señala la distribución de los sensores de este proyecto, donde se puede evidenciar, por lo menos, un sensor RFID en cada laboratorio y los sensores de control de las variables del entorno, situados en cada laboratorio [12].



**Ilustración 5 Topología de la red Universidad de Linnaeus [12].**

### 1.3 Definición del problema

En la Universidad de los Andes, existen tres antecedentes de suma importancia que permiten tener una mejor comprensión del problema. El primero tiene que ver con la gran afluencia de personas (estudiantes, profesores y administrativos) que han estado conectados a la red universitaria durante los últimos años; segundo, los dispositivos que se conectan al protocolo WiFi sufren un alto consumo energético y cuentan con un bajo espacio de alcance; y tercero, la ausencia de una infraestructura de red dedicada exclusivamente para el despliegue de Sistemas IoT.

De acuerdo con el boletín estadístico provisto por la Universidad de los Andes [4], detallado en la *Tabla 3*, para el primer semestre del 2022, la universidad contaba con aproximadamente 18.992 personas inscritas (cabe aclarar que este número se vio afectado por la pandemia), quienes, bajo unas condiciones de normalidad académica, estarían conectadas a la red provista para la universidad. A pesar de que este número de personas ha sido constante durante los últimos 3 años presentados en el informe, se prevé

que la cantidad de personas inscritas registre un crecimiento en la conectividad en los próximos años y un posible fallo en la prestación de servicios; ya que, teniendo en cuenta que —en promedio— cada persona posee 2 dispositivos conectados a la red, podría generarse un fallo masivo en la red que conecta a todos estos dispositivos. Además, para los dispositivos IoT, es preocupante que se puedan registrar estos fallos en tanto pueden contener información sensible como, en específico, todos los datos relacionados con el monitoreo de las variables del entorno de la comunidad universitaria.

Periodo	Estudiantes de pregrado	Estudiantes de maestría	Estudiantes de doctorado	Estudiantes de especialización	Profesores de planta	Total
2019-1	14.556	3.260	380	519	756	19.471
2019-2	14.398	3.366	385	510	756	19.415
2020-1	14.337	3.123	384	529	749	19.122
2020-2	14.124	3.442	398	555	749	19.268
2021-1	14.234	3.351	387	600	737	19.309
2021-2	14.013	3.706	407	555	737	19.418
2022-1	13.761	3.615	404	512	700	18.992

**Tabla 3 Población estudiantil [4]**

El segundo antecedente es el alto consumo energético que posee el estándar 802.11 (mejor conocido como WiFi) para los dispositivos IoT que lo utilizan dado que generan una reducción considerable en su tiempo de vida. Teniendo en cuenta que los servicios IoT de la Universidad de los Andes utilizan actualmente este protocolo, se ha buscado optimizar el consumo energético en el envío mediante el uso de protocolos de transmisión que logren optimizar el consumo de energía. La *Tabla 4* [5] exhibe una comparativa entre algunos protocolos de transmisión creados específicamente para los dispositivos IoT. Algunos protocolos como LoRa usan frecuencias de libre uso, junto con un rango de cobertura amplio y un envío de paquetes con un bajo consumo de energía. Por estas características, los protocolos LoRa permiten que los dispositivos IoT tengan una mayor duración de la batería en comparación con protocolos como el estándar 802.11.

Estándar IoT	LoRA	Sigfox	NB-IoT	WI-SUN	WM-BUS
<b>Frecuencia</b>	Sub-GHZ ISM sin licencia	Sub-GHZ ISM	700-990 MHz licenciada	Sub-GHZ RF sin licencia	868 MHz, 433 MHz o 169MHz sin licencia
<b>Tasa de envío</b>	0,3-27.5 kbps	0,1 kbps	150 kbps	100/150 kbps	2.4/4.8/19.2kbps
<b>Rango</b>	5-15/20 KM	30 -50 KM	22 KM	1-5 KM	500 M (868 MHz)
<b>Cobertura</b>	157 dB	148 dB	164 dB	2-12 dB	123 dB
<b>capacidad</b>	40000	50000	200000	Soporta millones	No especifica
<b>Throughput</b>	190 bps - 50 kbps	100 bps	250 kbps	300 kbps	4.8 -100 kbps
<b>Iniciación</b>	Nodo y servidor	Nodo	Nodo	Nodo y servidor	Nodo
<b>Escalabilidad</b>	Media	Baja	Alta	Alta	Media
<b>Topología de red</b>	Estrella	Estrella	Estrella	Malla, estrella	Estrella
<b>Red dedicada</b>	No	Sí	Sí	No	No
<b>Mensajes</b>	Ilimitados	140 Mensajes/día, 12 bytes/Mensaje	Ilimitados	Ilimitados	No especifica
<b>Latencia</b>	1-2s	1-2s	1.5-10s	0,02s	No especifica
<b>Modulación</b>	CSS/GFSK	UNB/GFSK/BPSK	QPSK/OFMDA	FSK	FSK/GFSK/MSK/ OOKU/ASK
<b>Bidireccional</b>	Sí/Half-duplex	Limitada/ Half-duplex	Sí/Half-duplex	Sí	Sí
<b>Estandarización</b>	LoRA Alliance	Sigfox Co	3GPP	WI-SUN Alliance	M-BUS

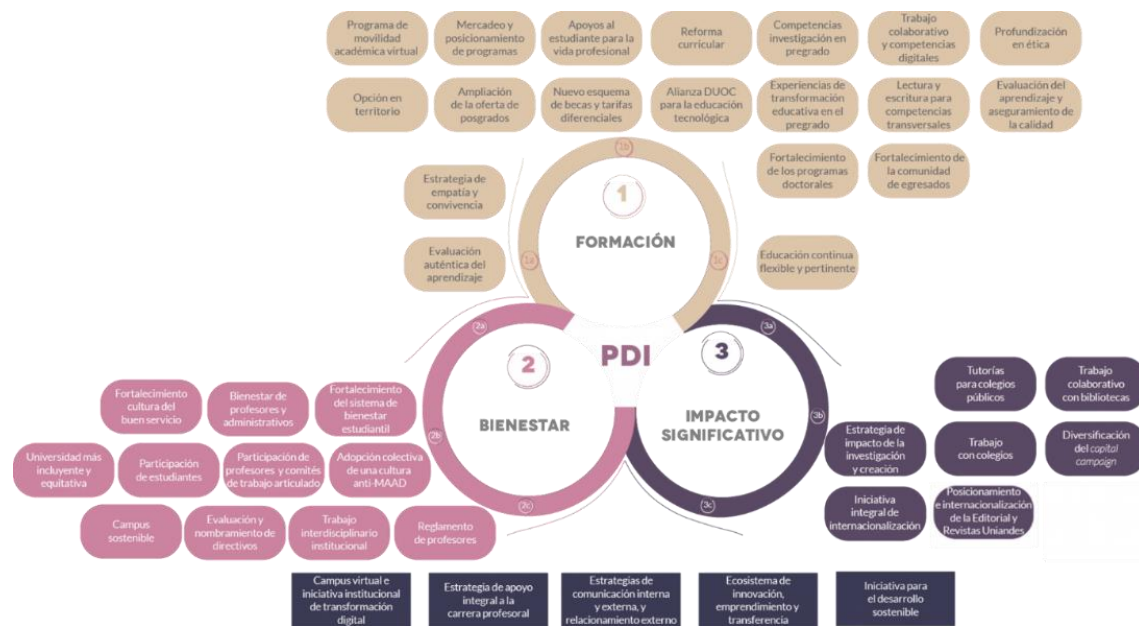
**Tabla 4 Comparación entre protocolos IoT [5].**

Por último, la Universidad de los Andes no cuenta con una infraestructura dedicada para la conectividad de los dispositivos IoT. Por esto, dichos dispositivos presentan una conectividad a través de WiFi que genera un mayor consumo energético ya que el protocolo no está optimizado para dispositivos IoT y, en caso de presentarse una sobrecarga de la red WiFi, tendría como consecuencia la pérdida masiva de datos sensibles de la comunidad universitaria.

## 1.4 Justificación

De acuerdo con el Programa de Desarrollo Integral (PDI), propuesto por la Universidad de los Andes para el período comprendido entre 2021-2025, se propone la iniciativa de impacto significativo *Campus virtual e iniciativa institucional de transformación digital*, con la finalidad de promover la evolución del campus por medio de propuestas que respondan a los retos actuales y futuros de la educación (ver *Ilustración 6*) [13]. Por esto, la actual

tecnología de red única para todos los dispositivos de la comunidad universitaria (incluidos los dispositivos IoT) y una posible instalación de nuevos dispositivos de monitoreo (dentro del mismo protocolo WiFi) son medidas poco convenientes para alcanzar los objetivos propuestos por la universidad, en especial, los relacionados con la transformación digital. En respuesta a las necesidades identificadas, este documento planea una arquitectura que brinda soporte para el cumplimiento de esta iniciativa en cuanto permite una exclusividad de los distintos dispositivos de monitoreo actuales y aquellos que se esperan integrar con el paso del tiempo.



**Ilustración 6 Iniciativas del PDI de la Universidad de los Andes 2021-2026 [13].**

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo General

Diseñar una arquitectura de red para un campus inteligente de la Universidad de los Andes, que permita la integración de diversos servicios IoT.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el tráfico que se comunicará a través de la arquitectura de red.
- Diseñar una arquitectura de red capaz de satisfacer la demanda de los generadores de tráfico de la red.
- Validar el correcto funcionamiento de la infraestructura de red para los dispositivos que se conectarán.

## 1.6 Metodología

El desarrollo de la arquitectura de red se basó en la metodología implementada por el libro *Network Design: Management and Technical Perspectives*, escrito por Teresa C. Piliouras [24], específicamente el capítulo enfocado en el diseño y planeación de redes de área local. Esta metodología establece tres etapas para la implementación de la red e, incluso, otorga una guía precisa en la selección de los parámetros de la red.

En la primera etapa se busca realizar una caracterización del tráfico que circulará a través de la red. La etapa inicial permite identificar los diferentes requerimientos solicitados por la red, así como las características fundamentales para su correcto funcionamiento, tales como: el tamaño promedio de los paquetes, protocolos de funcionamiento de la red, aplicaciones a soportar, número de estaciones dentro de la red y ancho de banda necesario para el funcionamiento. Esta metodología propone el desarrollo de planes de capacidad de la red para poder determinar los parámetros necesarios para el diseño e implementación de esta.

La segunda etapa propone un diseño de arquitectura de red, tomando en cuenta los valores seleccionados en la etapa anteriormente desarrollada. En esta etapa se proponen indicadores de rendimiento de la red y el modelamiento de parámetros de esta. Para el modelamiento de parámetros, se tienen en cuenta las variables fijas, tales como: la capacidad de transmisión (tanto de la red como de los nodos dispuestos), el retraso de propagación de los nodos de la red, la topología seleccionada para esta infraestructura y el tamaño de los paquetes. También, se encuentran métricas variables de la red, donde es posible identificar los diferentes protocolos de acceso de la red, el perfil del tráfico que se puede generar en cada estación y la manera en la cual se va a tratar la retransmisión de datos de la red y la colisión de los datos.

Por último, la metodología de Piliouras propone la implementación de sistemas de monitoreo dentro de la red ya establecida, los cuales permitan ver en tiempo real el comportamiento de la red, junto con el estado de los diferentes actores que la han utilizado. En esta etapa, se propone la creación de métricas que permitan observar el desempeño de la red, tales como: disponibilidad de la red, consumo de recursos y la tasa de transferencia efectiva de la red.

En definitiva, la metodología propuesta permite un diseño detallado de cada variable de la red, así como un perfilamiento exacto del tráfico que circulará a través de la red. Por lo tanto, metodológicamente, establece una gran ventaja en la elaboración de este proyecto ya que permite detallar precisamente los diferentes componentes necesarios para la realización de la arquitectura de red, destinada para la Universidad de los Andes, facilitando una mejor comprensión de cada uno.



## Identificación de tráfico de la red

Para poder realizar una caracterización del tráfico de la red, se toma como base uno de los servicios IoT desplegados actualmente en la Universidad de los Andes. Este servicio está enfocado en la medición de la calidad ambiental interna de los edificios a través de la medición de la temperatura, humedad, y nivel de CO<sub>2</sub> en los salones del campus universitario. Esta medición se realiza a través de sensores estacionarios en cada salón, los cuales monitorean estas variables e informan los resultados obtenidos cada 10 minutos. De acuerdo con información proporcionada por la Gerencia del Campus, los sensores envían simultáneamente estas variables en el mismo paquete y, en casos excepcionales, los paquetes pueden alcanzar a ocupar hasta 64 bytes.

### 1.7 Plan de capacidad

Para este plan de capacidad, además de la cantidad de salones en el campus de la Universidad de los Andes, también, se incluye cualquier espacio disponible en el cual se deban o puedan colocar sensores (cuartos eléctricos, laboratorios, auditorios, oficinas, entre otros).

De la información recopilada, se obtuvieron los siguientes resultados

Edificios	Pisos	Cantidad de puntos posibles
RGD	4	16
ML	8	284
SD	10	155
W	6	36
LL	3	23
C	6	78
B	4	33
Z	2	39
Y	1	19

Edificios	Pisos	Cantidad de puntos posibles
AU	4	47
S1	4	25
R	2	27
TX	6	27
H	4	28
M	3	13
Campito	2	72
I	1	4
IP	6	49
O	4	33
A	2	14
J	4	28
G	4	62
Q	6	45
<b>Total</b>		1157

**Tabla 5 Cantidad de puntos posibles**

De acuerdo con la información recopilada por los sensores instalados previamente en el edificio RGD de la Universidad de los Andes, se puede apreciar que, según la variable de medición utilizada, el tamaño del paquete enviado puede variar entre 16 y 64 bytes. Para este caso, se toma el paquete de 64 bytes como referencia y se asume que no se está usando ningún algoritmo de *scheduling*, que permita que estos dispositivos no envíen simultáneamente la información al *Gateway* dispuesto. Como se muestra en la *Tabla 6*, los resultados obtenidos incluyen un aumento del 20% del valor real destinado para el crecimiento de la red.

Edificios	Pisos	bits/s	Kbits/s	Aumento de 20% para crecimiento (kbits/s)
RGD	4	8192	8,192	9,8304
ML	8	145408	145,408	174,4896
SD	10	79360	79,36	95,232
W	6	18432	18,432	22,1184
LL	3	11776	11,776	14,1312
C	6	39936	39,936	47,9232
B	4	16896	16,896	20,2752

Edificios	Pisos	bits/s	Kbits/s	Aumento de 20% para crecimiento (kbits/s)
Z	2	19968	19,968	23,9616
Y	1	9728	9,728	11,6736
AU	4	24064	24,064	28,8768
S1	4	12800	12,8	15,36
R	2	13824	13,824	16,5888
TX	6	13824	13,824	16,5888
H	4	14336	14,336	17,2032
M	3	6656	6,656	7,9872
Campito	2	36864	36,864	44,2368
I	1	2048	2,048	2,4576
IP	6	25088	25,088	30,1056
O	4	16896	16,896	20,2752
A	2	7168	7,168	8,6016
J	4	14336	14,336	17,2032
G	4	31744	31,744	38,0928
Q	6	23040	23,04	27,648

**Tabla 6 Ancho de banda requerido por edificio.**

En concreto, el plan de capacidad, enseñado anteriormente, permite detallar el alto consumo de ancho de banda requerido por cada edificio del campus universitario para tener un sistema de monitoreo con las mismas características técnicas al caracterizado en las anteriores páginas.

## 1.8 Características fundamentales de la red

De acuerdo con el plan de capacidad anterior, se puede establecer que, en el campus de la Universidad de los Andes, hay aproximadamente 1,157 puntos disponibles donde se pueden colocar estaciones de trabajo de la red, así como el ancho de banda requerido por cada edificio para soportar los datos que se enviarán. Principalmente, se propone brindar soporte técnico a las aplicaciones IoT de monitoreo que están siendo ejecutadas actualmente en la Universidad de los Andes. En este diseño de arquitectura de red, se pretende utilizar el protocolo LoRa, enfocado en el envío de datos provenientes de sensores IoT.



## Diseño de la arquitectura de la red

Una vez identificado el tráfico de la red, el siguiente paso consiste en proponer el diseño, una arquitectura que satisfaga el plan de capacidad, anteriormente enunciado, y las características fundamentales de la red. Por esto, este documento propone la siguiente arquitectura y diseño de red, enfocados en la Universidad de los Andes.

### 1.9 Arquitectura de la red

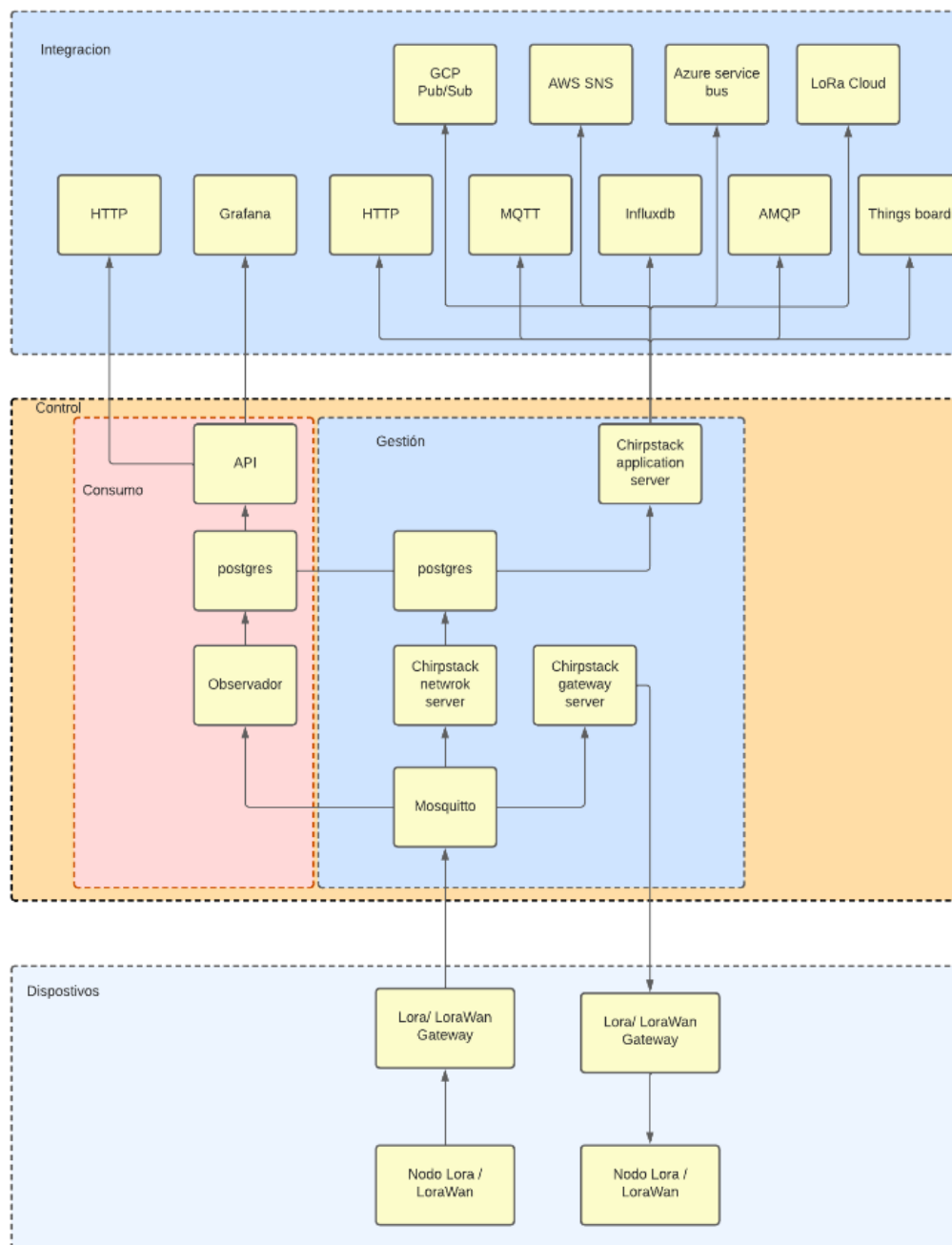
La arquitectura de la red propuesta está constituida por 3 capas distintas, las cuales se pueden apreciar en la *Ilustración 7*.

La primera capa es la capa de dispositivos, donde están situados todos los *Gateways* asociados a la topología de la red y los sensores pertenecientes a los *Gateways*.

La segunda capa es la de control, que está dividida en dos subcapas. Por un lado, la subcapa de consumo está encargada de almacenar los datos emitidos por la capa de dispositivos en una base de datos propia, sincronizada con la base de datos de la subcapa de gestión, y permitir el establecimiento de una arquitectura dedicada a la visualización y consumo de los datos producidos por los sensores o *Gateways*. Por otro lado, la subcapa de gestión permite administrar los dispositivos pertenecientes a la red, integrar nuevos *Gateways* a la topología y consultar el estado de los distintos componentes de la red. Para realizar esta subcapa de gestión, se utiliza *ChirpStack*, componente de código abierto, que facilita la administración de los componentes de la red LoRa/LoRaWan a través de un servidor LoRa [14].

Por último, la capa de integración se encarga de exponer los datos producidos por los elementos de la red. Tal como se muestra en la *Ilustración 7*, según la subcapa de control elegida, se pueden utilizar ciertos protocolos o servicios en específico. En el caso de la integración permitida por la capa de gestión, es posible encontrar protocolos como MQTT, AMQP, HTTP, entre otros; servicios como *things board*, GCP pub/sub, aws SNS, *azure*

*service bus*, LoRa Cloud, entre otros; o se pueden integrar bases de datos con series de tiempo como lo es, por ejemplo, influxdb. En otro sentido, la capa de consumo permite la integración del protocolo HTTP, con el fin de realizar peticiones permitiendo consultar los datos, y *Grafana*, con la intención de visualizar tableros de control a partir de los datos recopilados.



**Ilustración 7 Arquitectura de la red**

## 1.10 Diseño de la red

Para continuar discutiendo acerca del diseño de la red, se deben establecer algunos conceptos fundamentales de LoRa que influyen en la capacidad de transmisión de este protocolo.

El primer concepto fundamental es la frecuencia que pueden usar los canales de la topología. Para el caso puntual de LoRa y LoRaWan, esta frecuencia puede variar entre 125 khz, 250 khz y 500 khz [15]. El siguiente concepto fundamental es el *Spread Factor*, el cual se puede definir como el factor de esparcimiento de los paquetes durante su envío. Dicho factor oscila entre valores de 6 a 12 que, según el resultado, pueden afectar la tasa de transmisión y la distancia abarcada por el *Gateway* [16]. Por último, el *code rate* especifica cuál es la cantidad de bits enviados que transportan información útil y cuál es la cantidad de información redundante presente en cada envío realizado [17].

Estos tres conceptos afectan en la tasa de transmisión de la red LoRa. Es decir, permiten hacer una fluctuación en los distintos valores ofrecidos. La tasa de transmisión estará definida por la siguiente formula:

$$AB = \frac{SF * CR * BW}{2^{SF}}$$

### Fórmula 1. Cálculo de ancho de banda [25]

Donde AB se refiere al ancho de banda que puede soportar un *Gateway* de la red en kilobits por segundo, SF se refiere al *spread factor* seleccionado para la red, CR al *code rate* de cada red y BW a la frecuencia de onda que se está seleccionado en la topología.

Cabe recalcar la relación inversamente proporcional entre el ancho de banda escogido y la distancia que puede abarcar un solo *Gateway* de la red.

Dado el ancho de banda requerido, tomando en cuenta la *Fórmula 1*, se opta por tomar los siguientes valores de configuración de los *Gateways* para favorecer la optimización del ancho de banda al máximo posible: Code Rate: 4/5, Spread Factor: 6, y Frecuencia de onda: 500 Mhz

Por lo tanto, al aplicar los valores anteriormente mencionados dentro de la formula, se obtiene el siguiente resultado:

$$AB\left(\frac{kbit}{s}\right) = \frac{6 * \frac{4}{5} * 500}{2^6}$$

$$AB\left(\frac{kbit}{s}\right) = 37,5 \text{ kbit/s}$$

El resultado da a entender que cada Gateway que sea ubicado dentro de la topología de red tendrá un ancho de banda de **37,5 kbit/s**. En consecuencia, la *Tabla 7* presenta la distribución de los *Gateways*.

Edificios	Cantidad de Gateways
RGD	1
ML	5
SD	3
W	1
LL	1
C	2
B	1
Z	1
Y	1
AU	1
S1	1
R	1
TX	1
H	1
M	1
Campito	2
I	1
IP	1
O	1
A	1
J	1
G	2
Q	1
Total	32



**Tabla 7 Cantidad de Gateways por Edificio**

Por su lado, de acuerdo con las exigencias de ancho de banda requeridas por cada piso, la *Tabla 8* presenta la distribución de los *Gateways*. Para su elaboración, se priorizó el doble objetivo de abarcar la menor cantidad posible de *Gateways* y maximizar el uso de los *Gateways* en los edificios.

Edificio	Pisos	Cantidad
ML	1,2	1
	3,5	1
	4,6,8	1
	7 y 8	1
	7	1
RGD	1,2,3,4	1
SD	1,2,3,4,5	1
	6,7,8	1
	7	1
W	1,2,3,4,5,6,7,8	1
LL	1,2,3	1
C	1,2,3	1
	4,5,6	1
B	1,2,3,4	1
Z y	1,2	1
AU	1,2,3,4	1
S1	1,2,3,4	1
R	1,2	1
TX	1,2,3,4,5,6,7,8	1
M	1,2,3	1
Campito	1	1
	1,2	1
I y IP	1,2,3,4,5, sótano	1
O	1,2,3,4	1
A	1,2	1
J	1,2,3,4	1
G	1,2	1
	3,4	1
TX	1,2,3,4,5,6	1

**Tabla 8 Distribución de Gateways por piso**

## 1.11 Métricas de Modelamiento de la red

Ahora bien, para el diseño de esta red, se tomaron en cuenta diferentes factores que influyen el modelamiento de la red. El primer factor para considerar es la capacidad de transmisión que puede soportar esta red. De acuerdo con lo especificado anteriormente, la capacidad de transmisión debe ser de 37,5 kbit/s en cada Gateway. En total, esta red puede soportar hasta 1087,5 kbit/s de transmisión de datos, si se unifica la capacidad de todos los *gateways* dispuestos en cada edificio.

El siguiente factor para considerar es la topología de la red. De acuerdo con las características de las topologías de red LoRa, los nodos tienen comunicación punto a punto con el *Gateway* al cual están asociados. Por este motivo, un *Gateway* puede tener una comunicación multipunto con varios nodos para, de este modo, formar una topología de estrella. Dicho esto, se considera una topología de red en estrella aquella que permita la conectividad de los sensores al *Gateway* y, posteriormente, facilite el envío al bróker Mosquitto, a través del protocolo MQTT, para el correspondiente procesamiento y almacenamiento de la información recolectada.

A continuación, el factor considerado es el retardo nodal. Para este factor, se utiliza la fórmula correspondiente de retardo nodal ( $RetN$ ) (ver *Fórmula 2*), que consiste en la sumatoria del retardo de procesamiento ( $Ret_{proc}$ ), retardo de cola ( $Ret_{cola}$ ), retardo de transmisión ( $Ret_{trans}$ ) y retardo de propagación ( $Ret_{prop}$ ). Para obtener el valor de cada uno de estos retardos, se tuvo en cuenta la longitud del paquete ( $L$ ), el ancho de banda anteriormente calculado ( $AB$ ), la longitud máxima del enlace físico ( $LF$ ) y la propagación en el medio ( $PM$ ). En específico, el retardo de transmisión se calcula con la *Fórmula 3* que contiene la longitud del paquete ( $L$ ) y el ancho de banda ( $AB$ ). Mientras tanto, el retardo de propagación se calcula con la *Fórmula 4* que utiliza la longitud máxima del enlace físico ( $LF$ ) y la propagación en el medio ( $PM$ ).

$$RetN = Ret_{proc} + Ret_{cola} + Ret_{trans} + Ret_{prop}$$

**Fórmula 2. Cálculo de retardo nodal [26]**

$$Ret_{trans} = \frac{L}{AB}$$

### Fórmula 3. Cálculo de retardo de transmisión

$$Ret_{prop} = \frac{LF}{PM}$$

### Fórmula 4. Cálculo de retardo de propagación

Para el caso de este diseño, se toman los valores presentados en el manual de usuario del equipo de red LoRa dragino LG01N. De acuerdo con este documento, este *Gateway* posee un retardo de procesamiento de 0,0078 segundos y un retado de cola 0,00024 segundos [18]. Para los valores correspondientes al retador de transmisión, se tuvo en cuenta el valor máximo del paquete de LoRa de 222 bytes y el ancho de banda calculado anteriormente para la red de 37,5 kbit/s. Para el retardo de propagación, se tiene en cuenta la velocidad de propagación a través del aire correspondiente a 330 m/s y la distancia máxima posible de 20 m desde un nodo al respectivo *Gateway*. Por lo cual, el cálculo del valor del retardo nodal corresponde a los siguientes cálculos:

$$Ret_{trans} = \frac{1776 \text{ bits}}{37500 \frac{\text{bits}}{\text{sec}}}$$

$$Ret_{trans} = 0,04736 \text{ sec}$$

$$Ret_{prop} = \frac{20 \text{ m}}{330 \frac{\text{m}}{\text{sec}}}$$

$$Ret_{prop} = 0,06060 \text{ sec}$$

$$RetN = 0,00078 \text{ sec} + 0,00024 \text{ sec} + 0,04736 \text{ sec} + 0,06060 \text{ sec}$$

$$RetN = 0,108986061 \text{ sec}$$

Como se puede apreciar en el anterior cálculo, el retraso de transmisión nodal corresponde a 0,108 segundos por Gateway dentro de la red.

Los siguientes factores para tener en cuenta son los relacionados con las métricas de la variable, dentro de las cuales destacan el protocolo de acceso, el perfil de tráfico de la red, el tratamiento de la retransmisión y el manejo de colisiones presentadas.

Como protocolo de acceso de la red se escoge el protocolo LoRaWAN, operativo bajo la tecnología inalámbrica LoRa. De esta manera, el protocolo seleccionado permite una optimización energética que logra un aumento en el tiempo de vida de los sensores dentro de la red. Este protocolo permite 3 clases diferentes para su implementación. La primera es la *Clase A*, con una comunicación bidireccional entre dispositivos finales de bajo consumo ya que los dispositivos pueden entrar en modo *Sleep* y la comunicación es totalmente asíncrona [19]. La siguiente es la *Clase B*, con una comunicación bidireccional entre los dispositivos finales de la red, pero, a diferencia de la Clase A, con un enlace de descarga con latencia determinística y la sincronización de los dispositivos dentro de la red [19]. Por último, la *Clase C* permite una comunicación bidireccional entre los dispositivos finales con baja latencia [19]. Para los dispositivos energizados mediante baterías, de acuerdo con las circunstancias momentáneas, se puede cambiar temporalmente entre Clase A y Clase C [19].

En cuanto al perfil de tráfico de la red, primordialmente, se estima la circulación de tráfico correspondiente a la data generada por sensores. Esta data, al ser solo texto producido por los diferentes nodos de la red, no consume demasiado ancho de banda. Este tráfico funciona adecuadamente, según las especificaciones de los parámetros de la red dispuestas anteriormente, ya que no requiere un máximo de latencia.

Finalmente, para la retransmisión y el manejo de colisiones, se utiliza el algoritmo de detección de actividad de canal (CAD) ya que es el promovido por LoRa Alliance dado que optimiza correctamente el consumo energético de los nodos pertenecientes a la red. En agregado, este algoritmo permite la detección de la presencia del paquete de preámbulo de la red. La utilización de este algoritmo abre la puerta al uso del protocolo de acceso múltiple con escucha de señal portadora (CSMA), que permite un control de acceso al

medio detectando la actividad antes de transmitirla y evitando la colisión de paquetes por uso del mismo medio [20].



# Implementación del prototipo de la red y sistemas de monitoreo

Para cumplir con el propósito de este proyecto de grado, se llevó a cabo un prototipo de la red en el laboratorio de conectividad y redes usando un Gateway LoRa, 2 tarjetas programables Arduino Mega que funcionan como nodos dentro de la red y 3 servidores virtualizados que poseen diferentes funcionalidades de red cada uno.

## 1.12 Implementación de prototipo de la red

El Gateway LoRa usado para esta implementación es un Dragino LG01-N que cuenta con un solo de canal de comunicación. Este Gateway posee un sistema operativo Linux con un procesador de 4000 mhz, memoria RAM de 64 MB y memoria flash de 16 MB. También, tiene diferentes métodos de conectividad ya que posee distintas interfaces, dentro las que se destacan LoRa Wirless, 802.11 b/n/g y Qectel EC25 LTE —la última está encargada de permitir una comunicación 4G LTE al Gateway—. Tanto la interfaz WiFi como el módulo LTE funcionan como puente entre los sensores que marchan bajo redes LoRA y los servidores alojados en redes IP [21].

Como se puede apreciar en la *Ilustración 8*, el *Gateway* descrito anteriormente fue configurando con los valores calculados para la red de esta iniciativa. De la misma manera, se colocó en modo MQTT para que pudiese enviar los datos recibidos de los sensores a la MQTT dispuesta en uno de los servidores, tal como aparece en la *Ilustración 9*. Adicionalmente, al *Gateway* se le ha colocado una antena LoRa de 915 MHz para exteriores con la intención de extender su cobertura la mayor cantidad de metros posibles.

The screenshot shows the Dragino LoRa Configuration web interface. The browser address bar displays `157.253.205.68:8000/cgi-bin/lora-lora.has`. The interface has a navigation bar with tabs: LoRa, LoRaWAN, HTTP, MQTT, TCP, Custom, Network, System, and Log. The 'LoRa' tab is selected.

### LoRa Configuration

Debug Level:

#### Radio Settings

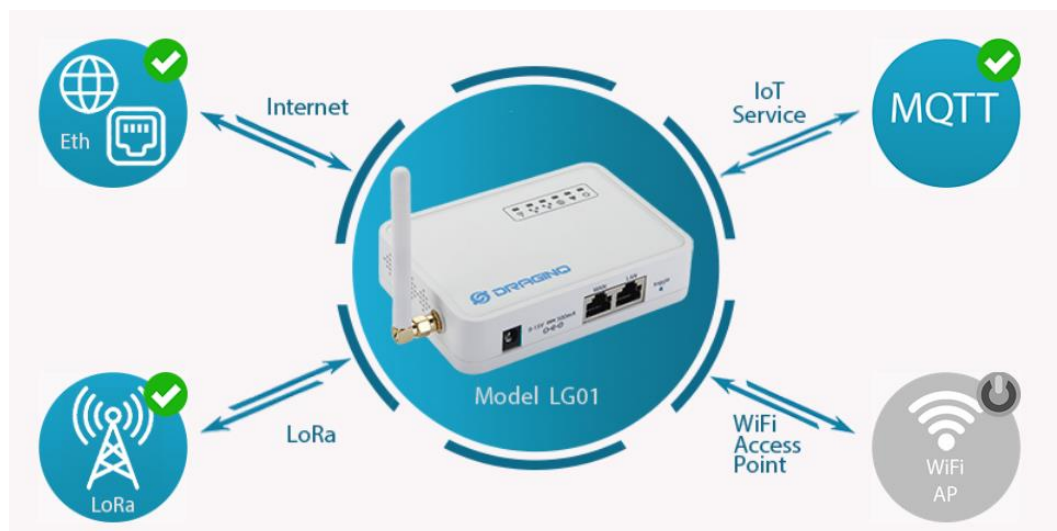
Frequency (Hz)	<input type="text" value="915000000"/>	RF Bandwidth (Hz)	<input type="text" value="500kHz"/>
Spreading Factor	<input type="text" value="SF6"/>	Coding Rate	<input type="text" value="4/5"/>
Preamble Length	<input type="text" value="8"/>	LoRa Sync Word	<input type="text" value="52"/>
RF Power (0-20) dBm	<input type="text" value="20"/>		

#### Static GPS coordinates ?

Enable Static GPS	<input checked="" type="checkbox"/>	Altitude (m)	<input type="text" value="450"/>
Latitude	<input type="text" value="22.700000"/>	Longitude	<input type="text" value="114.240000"/>

Buttons:

**Ilustración 8 Configuración Gateway LoRa.**

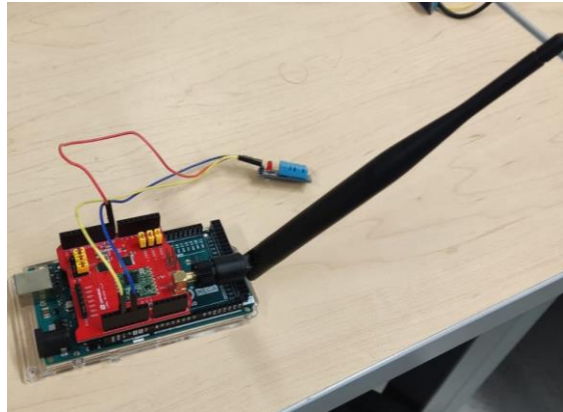


**Ilustración 9 Modo de funcionamiento del Gateway LoRa.**

Para desplegar los nodos pertenecientes a la red, se utilizaron 2 tarjetas programables *Arduino Mega* que contaban con una tarjeta expansiva, llamada *Dragino Shield*, con la función de enviar datos bajo los parámetros de configuración del *Gateway* de la red. En sus versiones más recientes, este *shield* permite la integración del sensor GPS para saber

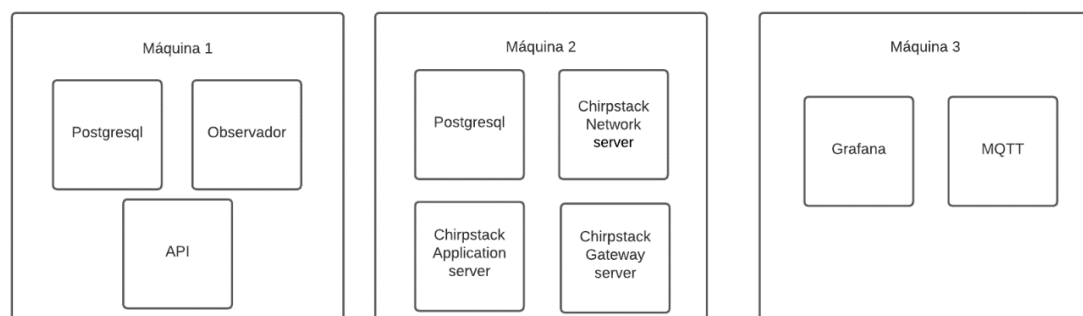


con más precisión la ubicación de los sensores. Al mismo tiempo, estos sensores tienen integrado un sensor DHT-11 que toma valores de temperatura y humedad en el ambiente. Al estar situados en el laboratorio de conectividad y redes, estos nodos están enviando información sobre la temperatura y humedad del espacio en que se encuentra.



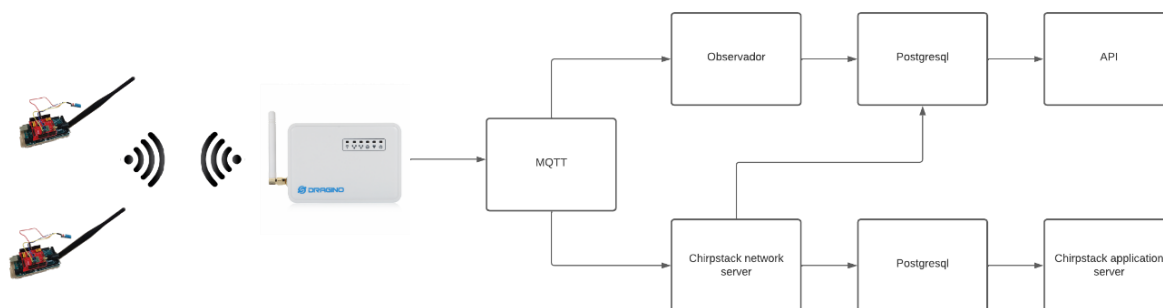
**Ilustración 10 Nodo LoRa de la red.**

Para los sistemas de monitoreo, se desplegaron los diferentes componentes de la arquitectura, propuesta en la *Ilustración 7*, en 3 máquinas virtuales diferentes. La primera máquina contenía la base de datos, el observador y la interfaz de programación de aplicaciones (API por sus siglas). La segunda máquina virtual contenía todo lo relacionado a la capa de gestión de la arquitectura, a excepción del bróker MQTT utilizado. La última máquina contenía el bróker MQTT de la red y el servidor *Grafana* que detalla los datos de la red en las bases de datos. Para mostrarlo, los servicios de monitoreo de la red desplegados en cada máquina se pueden apreciar fácilmente en la *Ilustración 11*.



**Ilustración 11 Servicios desplegados en las máquinas virtuales.**

La *Ilustración 12* muestra el diagrama de comunicación con los servicios desplegados. Los datos generados por los sensores son enviados directamente al Gateway LoRA. En este caso, el Dragino disponible se encarga de redirigirlo al bróker MQTT disponible. Una vez están los datos en el bróker, el observador es el encargado de guardar el dato en la base de datos y, a su vez, el *network server* es el encargado de escribirlo en su base de datos y comprobar la integridad de las bases de datos. Por último, el API y el *application server* son los encargados de exponer los datos que se registraron en las bases de datos generadas por los dispositivos.



**Ilustración 12 Diagrama de comunicación de los sensores.**

La *Ilustración 13*, *Ilustración 14* e *Ilustración 15* nos permiten visualizar los distintos componentes del diagrama de comunicación. La *Ilustración 13* se visualiza la información enviada por los sensores y mostrada por el API, mientras que las *Ilustraciones 14* y *15* nos permiten visualizar el *application server* en el podemos ver el estado de los Gateways pertenecientes a la red, así como los datos detectados por este.

← → ↻ ⚠ No es seguro | 157.253.205.98:3000/sensores/1111

```

[{"id": "1111", "name": "sensor laboratorio", "lat": "0", "long": "0", "datos": [{"id": "61510", "timestamp": "1668707118410", "dato": "48.0", "unidad": "%"}, {"id": "61508", "timestamp": "1668707105077", "dato": "19.7", "unidad": "C°"}, {"id": "61506", "timestamp": "1668707092258", "dato": "19.7", "unidad": "C°"}, {"id": "61504", "timestamp": "1668707076970", "dato": "48.0", "unidad": "%"}, {"id": "61502", "timestamp": "1668707065817", "dato": "48.0", "unidad": "%"}, {"id": "61500", "timestamp": "1668707052415", "dato": "48.0", "unidad": "%"}, {"id": "61498", "timestamp": "1668707038931", "dato": "19.8", "unidad": "C°"}, {"id": "61496", "timestamp": "1668707026659", "dato": "19.8", "unidad": "C°"}, {"id": "61494", "timestamp": "1668707011020", "dato": "48.0", "unidad": "%"}, {"id": "61492", "timestamp": "1668706999107", "dato": "48.0", "unidad": "%"}, {"id": "61490", "timestamp": "1668706987000", "dato": "48.0", "unidad": "%"}, {"id": "61488", "timestamp": "1668706973530", "dato": "19.7", "unidad": "C°"}, {"id": "61486", "timestamp": "1668706962633", "dato": "48.0", "unidad": "%"}, {"id": "61484", "timestamp": "1668706948196", "dato": "19.8", "unidad": "C°"}, {"id": "61482", "timestamp": "1668706932972", "dato": "48.0", "unidad": "%"}, {"id": "61480", "timestamp": "1668706921025", "dato": "48.0", "unidad": "%"}, {"id": "61478", "timestamp": "1668706907428", "dato": "19.8", "unidad": "C°"}, {"id": "61476", "timestamp": "1668706896986", "dato": "48.0", "unidad": "%"}, {"id": "61474", "timestamp": "1668706882161", "dato": "19.8", "unidad": "C°"}, {"id": "61472", "timestamp": "1668706867008", "dato": "48.0", "unidad": "%"}]}]
  
```

**Ilustración 13 Datos de los sensores expuestos por el API.**

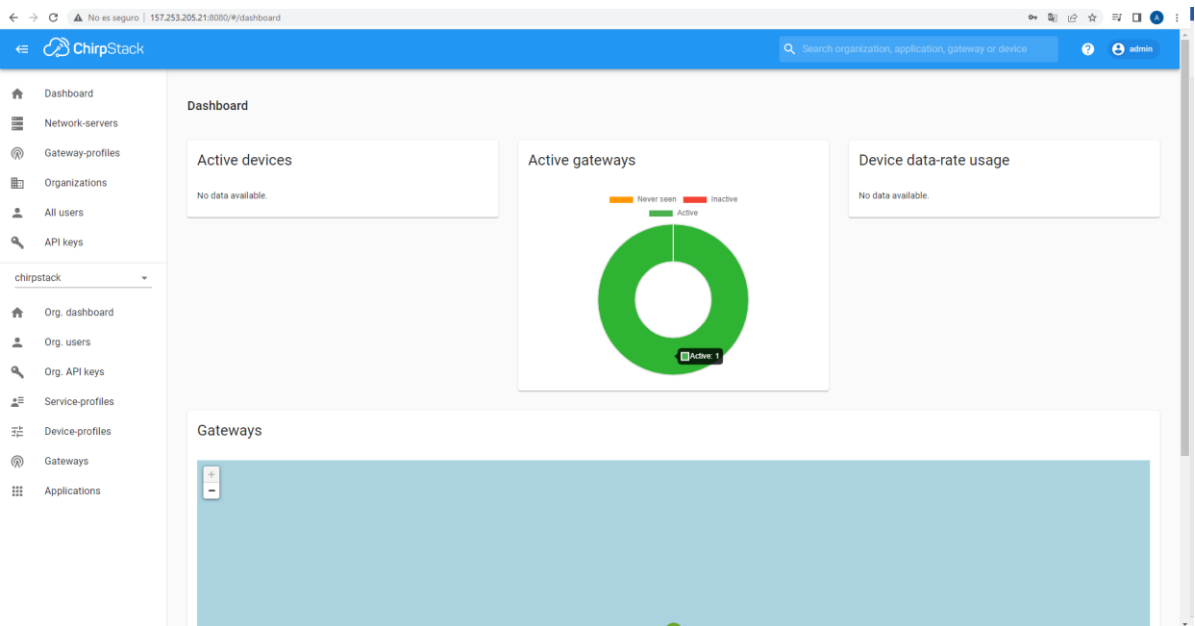


Ilustración 14 Panel de control de Chirpstack.

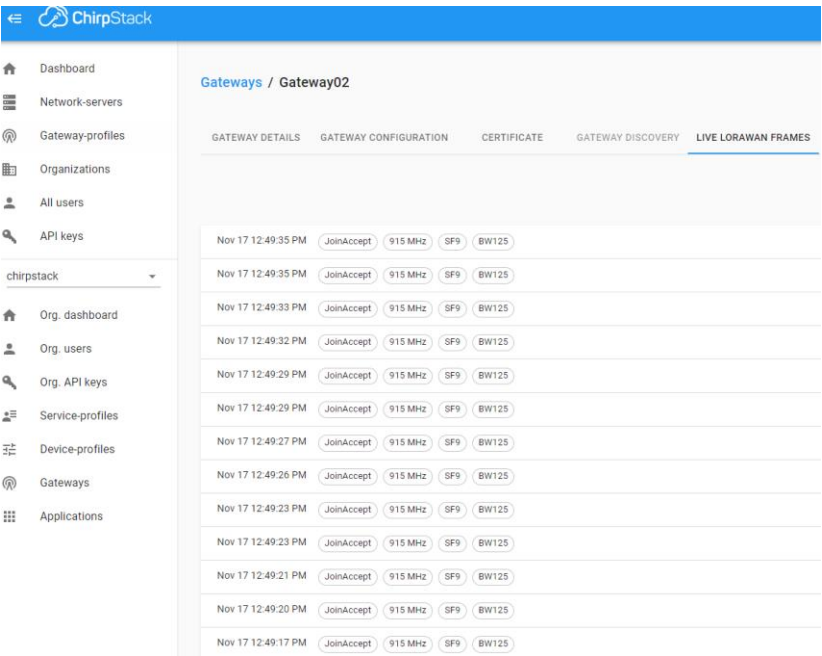


Ilustración 15 Datos LoRA detectados por el Gateway.

### 1.13 Análisis de los resultados obtenidos

Una vez implementado el prototipo de la red, se realizaron 2 pruebas distintas con el propósito de comprobar el funcionamiento de la red. La primera prueba constaba en hacer funcionar los nodos de la red toda una semana sin descanso y la segunda prueba consistía en ejecutar el envío de datos con los nodos en movimiento.

En la primera prueba se enviaron los valores de temperatura y humedad correspondientes al laboratorio de conectividad y redes de comunicaciones. Esta prueba estuvo corriendo alrededor de una semana, transmitiendo las 24 horas del día la información correspondiente. De esta prueba, cabe recalcar que, al momento de observar los resultados, no se evidenció la pérdida de ninguno de los paquetes y tampoco hubo pérdidas en la integridad de los paquetes.

En la segunda prueba, se decidió comprobar el comportamiento de la red, mientras se utilizan nodos en movimiento. Para esto, se utilizaron las escaleras internas del edificio Mario Laserna (ML) con el fin de recorrerlas y comprobar la integridad de los paquetes enviados. A partir de esta prueba, se percibió que la mayoría de los paquetes llegaron correctamente, a excepción de algunos que llegaron con la variable corrupta, tal y como se evidencia en la *Ilustración 16*.

10 rows returned

	id integer	name character varying	unidad character varying
1	1	hum	%
2	2	tem	C°
3	3	kum	%
4	4	tei	C°
5	5	hua	%
6	6	tem	C°
7	7	tee	C°
8	8	tee	#°
9	9	wee	C°
10	10	um	%

**Ilustración 16** Datos enviados corruptos.





# Conclusiones y trabajo a futuro

## 1.14 Conclusiones

En este trabajo de tesis se presentó el diseño de una arquitectura de red para *Smart Campus* en la Universidad de los Andes, utilizando LoRa como la tecnología de comunicación seleccionada y una prueba de concepto de esta red. Para conseguirlo, se creó una arquitectura de red que permite dar soporte tanto al protocolo de red LoRaWAN como al estándar LoRa. Finalmente, se utilizó el prototipo de la arquitectura de red para poder realizar pruebas de cobertura y pruebas de funcionamiento de integridad de la red.

En suma, se determinó la cantidad de *gateways* necesarios en cada edificio del campus universitario para contar con una cobertura total de los lugares donde, posiblemente, se pueda colocar un sensor. Gracias a un plan de capacidad elaborado con datos obtenidos de sensores reales que funcionaban bajo el protocolo de red WiFi, los sensores fueron estimados.

Por último, se propusieron los parámetros básicos de la red. Tomando en cuenta los requisitos de conectividad requeridos, estos valores fueron propuestos en virtud del plan de capacidad creado por el proyecto. De este modo, se logró la creación de una arquitectura con el servicio de administración de *gateways* y sensores, separada del servicio de exposición de datos.

## 1.15 Trabajo a futuro

Teniendo en cuenta las limitaciones con las que se realizó este proyecto, así como las que se fueron presentando en el proceso de investigación, se propone para un trabajo futuro lo siguiente:

Primero, debido a la poca cantidad de *Gateways* con las que se contaba para su implementación, no se puede definir correctamente el comportamiento de la red ya que no

se cuenta con una cantidad correcta de *Gateways* para una implementación más robusta de las pruebas.

Segundo, debido a la poca cantidad de sensores con la que se contaba en la implementación del proyecto, no se pudo obtener con precisión el consumo exacto de estos en un despliegue real. Un despliegue con una cantidad robusta de sensores permitiría obtener el valor exacto de la sobrecarga generada por los sensores a un solo *Gateway*.

Finalmente, se contaban con *Gateways* diseñados para un despliegue prototipo que, solamente, permitía la conexión de 100 a 1000 sensores por cada unidad. Con la inclusión de *Gateways* mucho más robustos no solo se permitiría el aumento en la cantidad de sensores que se pueden acoger en una unidad, sino que, también, mejoraría el tiempo de respuesta y el desempeño en la comunicación de los distintos sensores.



# Bibliografía

- [1] Del-Valle-Soto, C., Valdivia, L. J., Velázquez, R., Rizo-Dominguez, L., & López-Pimentel, J.-C. (2019). Smart campus: An experimental performance comparison of collaborative and cooperative schemes for Wireless Sensor Network. *Energies*, 12(16), 3135. <https://doi.org/10.3390/en12163135>
- [2] Publicado por Rosa Fernández, & 2021, 23 nov. (2021, November 23). *Internet de las cosas (IOT): Dispositivos conectados en el Mundo 2019-2030*. Statista. Retrieved June 8, 2022, from <https://es.statista.com/estadisticas/517654/prevision-de-la-evolucion-de-los-dispositivos-conectados-para-el-internet-de-las-cosas-en-el-mundo/>
- [3] Fraga-Lamas, P., Celaya-Echarri, M., Lopez-Iturri, P., Castedo, L., Azpilicueta, L., Aguirre, E., Suárez-Albela, M., Falcone, F., & Fernández-Caramés, T. M. (2019). Design and experimental validation of A Lorawan fog computing based architecture for IOT enabled Smart Campus Applications. *Sensors*, 19(15), 3287. <https://doi.org/10.3390/s19153287>
- [4] Universidad de los Andes. (2021, August). Suplemento estadístico 2021. Bogotá.
- [5] Anani, W., Ouda, A., & Hamou, A. (2019). A survey of Wireless Communications for IOT echo-systems. *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. <https://doi.org/10.1109/ccece.2019.8861764>
- [6] Ghosh, R., Komma, S. P., & Simmhan, Y. (2018). Adaptive Energy-aware scheduling of dynamic event analytics across edge and cloud resources. *2018 18th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGRID)*. <https://doi.org/10.1109/ccgrid.2018.00022>
- [7] *World Internet Users Statistics and 2022 World Population Stats*. Internet World Stats. (n.d.). Retrieved June 8, 2022, from <https://www.internetworldstats.com/stats.htm>
- [8] *Infografía: El imparable Crecimiento del Internet de las cosas*. Smart Travel News. (2016, May 14). Retrieved June 8, 2022, from <https://www.smarttravel.news/infografia-el-imparable-crecimiento-del-internet-de-las-cosas/>
- [9] Del-Valle-Soto, C., Valdivia, L. J., Velázquez, R., Rizo-Dominguez, L., & López-Pimentel, J.-C. (2019). Smart campus: An experimental performance comparison of collaborative and cooperative schemes for Wireless Sensor Network. *Energies*, 12(16), 3135. <https://doi.org/10.3390/en12163135>
- [10] *Homepage*. LoRa Alliance®. (2022, April 20). Retrieved June 8, 2022, from <https://lora-alliance.org/>

- [11] Webb, J., & Hume, D. (2018). Campus IOT collaboration and governance using the NIST Cybersecurity Framework. *Living in the Internet of Things: Cybersecurity of the IoT - 2018*. <https://doi.org/10.1049/cp.2018.0025>
- [12] Iftikhar, M. U., Ramachandran, G. S., Bollandsee, P., Weyns, D., & Hughes, D. (2017). Deltaiot: A self-adaptive internet of things exemplar. *2017 IEEE/ACM 12th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS)*. <https://doi.org/10.1109/seams.2017.21>
- [13] Universidad de los Andes. (2021). Programa de Desarrollo Integral. Bogotá.
- [14] *ChirpStack, open-source lorawan® network server*. ChirpStack. (n.d.), from <https://www.chirpstack.io/>
- [15] *Modulation & Data Rate*. The Things Network. (n.d.). from <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/modulation-data-rate/>
- [16] *Spreading factors*. The Things Network. (2021, November 26). from <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/spreading-factors/>
- [17] *Modulation & Data Rate*. The Things Network. (n.d.). from <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/modulation-data-rate/>
- [18] *LG01N\_LoRa\_Gateway\_User\_Manual\_v1.4.0.pdf*. (n.d.).
- [19] *What is lorawan® specification*. LoRa Alliance®. (2022, June 25). from <https://loro-alliance.org/about-lorawan/>
- [20] Tsoi, M. H., Ng, T. H., Lun, D. P. K., Choy, Y. S., & Mung, S. W. Y. (2020). LoRa Data Throughput Enhancement by Slotted Channel Activity Detection. In 2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). 2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2020). IEEE. <https://doi.org/10.1109/apmc47863.2020.9331636>
- [21] *LG01-N Single Channel Lora IOT gateway*. Dragino. (n.d.). <https://www.dragino.com/products/lora/item/143-lg01n.html>
- [22] Xu, Q.; Su, Z.; Wang, Y.; Dai, M. A Trustworthy Content Caching and Bandwidth Allocation Scheme with Edge Computing for Smart Campus. *IEEE Access* 2018, 6, 63868–63879. [CrossRef]
- [23] Chang, Y.; Lai, Y. Campus Edge Computing Network Based on IoT Street Lighting Nodes. *IEEE Syst. J.* 2018, doi.10.1109/JSYST.2018.2873430. [CrossRef]
- [24] Piliouras, T. C. (2005). *Network Design: Management and Technical Perspectives* (2nd ed.). Auerbach Publ., CRC Press.
- [25] What are Lora® and Lorawan®? LoRa Developer Portal. (n.d.). from <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>

- 
- [26] *Daniel Morató Osés*. Daniel Morato Home Page. (n.d.). Retrieved December 6, 2022, from <https://www.tlm.unavarra.es/~daniel/>