

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ESTUDIO DEL DISEÑO DE UN SISTEMA IoT PARA EL MONITOREO DE  
DATOS DE USO, ALERTAS Y GEOLOCALIZACIÓN EN REFRIGERADORES  
PARA VENTAS DE UNA EMPRESA DE LACTEOS USANDO LA RED**

**LoRaWAN**

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE BACHILLER  
EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**AUTOR**

James Miguel Jaramillo Huaman

**ASESOR:** Ing. Luis Angelo Velarde Criado

**COASESOR:** Ing. Angel Kamt Marconi

Lima, noviembre, 2020

## Resumen

La Transformación Digital se está agilizando debido al COVID-19 y la necesidad de realizar actividades remotas a través de Internet. Las empresas empiezan a adoptar este cambio de paradigma y aplicarlo en los problemas de sus negocios. A partir de ello, se explota el concepto Internet de las Cosas (por sus siglas en inglés, IoT). IoT hace referencia a sistemas embebidos con sensores asociados a cosas y que tienen conectividad a Internet. Se puede acceder a los datos de los sensores desde cualquier dispositivo conectado a Internet; estos proveen información que ayuda a mejorar la toma de decisiones para crear soluciones más inteligentes.

Existe una empresa de lácteos que entrega en calidad de préstamo refrigeradores de exhibidor a terceros para promocionar sus productos y agilizar sus ventas. Sin embargo, es complicado tener un control real de estos activos tangibles. La empresa requiere un sistema que les permita establecer una geocerca (una cerca virtual delimitada por coordenadas geográficas) y enviar una alerta en caso el refrigerador sea trasladado fuera. Asimismo, se propone integrar un sistema de adquisición de datos, de tal manera que se envíe de forma periódica la temperatura en la cabina interna, la temperatura en el motor y la cantidad de aperturas y cierres de su puerta. Los refrigeradores están distribuidos en la ciudad de Lima, lo que exige una cobertura de red en la escala de los kilómetros.

Para solucionar lo planteado se propone un sistema IoT con el uso de sensores como: acelerómetro, un receptor GNSS (para la geolocalización) y sensores de temperatura (diseñados con RTDs). Además, se necesita LEDs indicadores y un *reed switch* para el monitoreo de uso de la puerta. Se propone desplegar este sistema con la tecnología LoRaWAN porque la antena de un Gateway brinda cobertura mayor a los 10 km con un bajo consumo de energía eléctrica. En general, se propone un esquema de red donde cientos de nodos (los dispositivos asociados al refrigerador) se conectan mediante un transceptor LoRa al Gateway más cercano que, a su vez, está conectado a Internet. Estos Gateways son administrados por un servidor de *Back-end* que preprocesa la información, identifica su origen, decodifica y lo reenvía a un servidor de aplicación que alojará un programa para visualizar los datos y alertas en una plataforma Web tipo *dashboard*.

# Índice General

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introducción</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1. Marco problemático</b>  | <b>2</b>  |
| 1.1. Contexto y formulación del problema . . . . .                            | 2         |
| 1.1.1. La revolución digital y el Internet de las Cosas . . . . .             | 2         |
| 1.1.2. La problemática de las empresas en el control de sus activos . . . . . | 3         |
| 1.2. Estado del arte y justificación del estudio . . . . .                    | 5         |
| 1.2.1. Tecnologías de comunicación inalámbrica disponibles para IoT . . . . . | 5         |
| 1.2.2. Sistemas existentes para geolocalización . . . . .                     | 6         |
| 1.2.3. Sistemas electrónicos para adquisición de datos . . . . .              | 7         |
| 1.2.4. Arquitecturas de red IoT existentes . . . . .                          | 9         |
| 1.3. Objetivos del trabajo de investigación . . . . .                         | 11        |
| 1.3.1. Objetivo General . . . . .   | 11        |
| 1.3.2. Objetivos Específicos . . . . .  | 11        |
| <b>2. Fundamentos para el desarrollo del diseño</b>                           | <b>12</b> |
| 2.1. Sistemas Globales de Navegación por Satélite . . . . .                   | 12        |
| 2.2. Sensores . . . . .   | 13        |
| 2.2.1. Acelerómetro . . . . .   | 13        |
| 2.2.2. Sensor de temperatura . . . . .  | 13        |
| 2.2.3. Sensor de apertura y cierre de una puerta . . . . .                    | 14        |
| 2.3. Low Power Wide Area Network (LPWAN) . . . . .                            | 15        |
| 2.3.1. LoRaWAN . . . . .  | 15        |
| 2.3.2. SigFox . . . . .   | 16        |
| 2.4. Modelo de solución propuesto . . . . .                                   | 17        |
| <b>Conclusiones</b>   | <b>18</b> |
| <b>Recomendaciones</b>  | <b>19</b> |
| <b>Bibliografía</b>   | <b>20</b> |

# Introducción

En los últimos años estamos viviendo una revolución que ocurre cada vez más rápido, esta nueva forma de concebir el mundo es la Transformación Digital. En el libro “Revolución.pe: La transformación digital de once empresas del Perú” [1], se define a la transformación digital como el conjunto de decisiones estratégicas que toman las empresas como consecuencia del impacto de las tecnologías digitales. Sin duda, las empresas reconocen el potencial de innovar y adoptar nuevas metodologías ágiles para dar frente a este nuevo paradigma. Es en este contexto donde nace un nuevo concepto que contribuye en la interconexión digital: el Internet de las Cosas (por sus siglas en inglés, IoT).

El impacto del presente estudio es mostrar a las empresas la viabilidad de las tecnologías actuales para diseñar un sistema IoT como herramienta moderna e inteligente en la solución de sus problemas. En el presente estudio, la problemática a abordar es la falta de control y de seguridad en la integridad de refrigeradores para puntos de venta; estos refrigeradores son activos tangibles de una empresa de lácteos que los entrega como préstamo a terceros. En ese sentido, el objetivo principal es analizar y proponer el diseño de un sistema IoT para el monitoreo de datos de uso, alertas y geolocalización de refrigeradores para ventas usando la red LoRaWAN. Para ello, se estudia los fundamentos teóricos que sirvan para proponer criterios en la selección de sensores y en el desarrollo de la arquitectura de red IoT. A pesar que este estudio analiza un caso en particular, el diseño propuesto se puede extrapolar a más cosas.

# Capítulo 1

## Marco problemático

### 1.1. Contexto y formulación del problema

#### 1.1.1. La revolución digital y el Internet de las Cosas

La historia del hombre está marcada por grandes hitos que han logrado reconfigurar la mentalidad de las sociedades. La globalización es uno de estos procesos revolucionarios que amplía el alcance de las tecnologías a escala mundial, como el uso masivo del Internet. Esto se hace mucho más visible con la llegada de los dispositivos móviles inteligentes. Según un pronóstico de la *International Data Corporation* (IDC) estima que habrá 41.6 mil millones de dispositivos conectados que generarán 79.4 zettabytes (ZB) de datos en 2025 [2].

En este contexto nace el concepto de Internet de las Cosas (por sus siglas en inglés, IoT); este concepto es empleado para describir dispositivos embebidos con sensores asociados a cosas (*things*) ordinarias y que tienen conectividad con Internet. Esta característica permite generar una interacción desde cualquier dispositivo conectado a Internet (laptops, smartphones, tablets, etc). Asimismo, es una herramienta que provee información de sus sensores, lo cual ayuda a mejorar la toma de decisiones para crear soluciones más inteligentes y de escala global.

En el reporte “IoT Signals” de Microsoft [3] realizado en el año 2019 se revelan estadísticas sobre la manera en que el IoT está revolucionando la forma en que las compañías realizan sus negocios. Este reporte es el resultado de una encuesta realizada a 3000 personas involucradas con el IoT y que tienen poder de toma de decisiones para sus empresas (“*enterprise companies*”) en países como Estados Unidos, Reino Unido, Alemania, Francia, China y Japón. Dichas compañías pertenecen a industrias relacionadas con los sectores de manufactura, vendedores minoristas/mayoristas (*retail/wholesale*), gobierno, transporte, cuidado de la salud, entre otros. El 88 % de estas personas opina que el uso de sistemas IoT es un factor muy crítico para el éxito de

sus negocios. Estos “*decision-makers*” consideran que las razones principales para adoptar soluciones IoT son:



Figura 1.1: Razones que motivan a *decisión-makers* para adoptar soluciones IoT en sus empresas. Diagrama realizado en base al reporte de Microsoft [3]

Como se puede observar, un 33 % de ejecutivos justifican la adopción de soluciones IoT para una razón tan puntual como es el seguimiento de activos. Dicha razón, desde cierta perspectiva, está relacionada con el tema seguridad y protección, el cual posee un 44 % de opiniones a favor. En efecto, estas estadísticas permiten inferir que muchos de los sistemas IoT son valorados como medida de prevención ante robos, fraudes o en el aseguramiento de la aplicación de los procesos establecidos. Las estadísticas mostradas demuestran el gran impacto que pretende tener el IoT en la problemática de las empresas relacionada al control de sus activos.

### 1.1.2. La problemática de las empresas en el control de sus activos

Es sabido que todas las empresas de la industria poseen un registro de sus activos en sus libros contables. El Estado Peruano, desde la SUNAT (Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria) considera a la Norma Internacional de la Contabilidad (NIC), la cual define a los activos tangibles como las propiedades, planta y equipos que posee una entidad para su uso en la producción o suministro de bienes, para arrendarlos a terceros o para propósitos administrativos [4]. A pesar de que una empresa tenga organizado sus recursos, siempre existe el riesgo de robo o fraude a sus activos tangibles.

En el reporte a las naciones realizado por ACFE [5] se revelan estadísticas sobre impacto del fraude ocupacional. Este reporte se basa en un estudio de 1843 casos de fraude laboral que

ocurrieron en todo el mundo (106 naciones) entre enero de 2008 y diciembre 2009. Más del 40 % de los casos ocurrieron fuera de Estados Unidos, lo que proporciona una visión bastante aproximada del verdadero alcance del fraude ocupacional a escala mundial. En dicho reporte se puede encontrar información clasificada en subcategorías relacionadas a la apropiación indebida de activos. Estos datos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1.1: Impacto del fraude laboral y la apropiación indebida de activos

| <b>Categoría</b>                   | <b>Definición</b>   | <b>Casos reportados</b> | <b>Porcentaje de todos los casos<sup>1</sup></b> | <b>Perdida media</b> |
|------------------------------------|---|-------------------------|--|----------------------|
| Skimming                           | Sustracción anterior a la registraci3n contable.              | 267                     | 14.5 %   | \$ 60 000            |
| Robo en efectivo                   | Sustracci3n con posterioridad a la registraci3n.              | 181                     | 9.8 %  | \$ 100 000           |
| Billing                            | Fraude con facturas falsas                                    | 479                     | 26.0 %   | \$ 128 000           |
| Gastos falsos                      | Fraude con facturas reales por conceptos falsos o excedidos   | 278                     | 15.1 %   | \$ 33 000            |
| Fraude con cheques                 | Fraude alteraci3n de valores o por robo de cheques            | 274                     | 13.4 %   | \$ 131 000           |
| Nomina                             | Ejem: Un empleado reclama pago por horas extra que no realiz3 | 157                     | 8.5 %  | \$ 72 000            |
| Registros falsos                   | Fraude con registros falsos de efectivo                       | 55                      | 3.0 %  | \$ 23.000            |
| Cash on Hand                       | Uso indebido del efectivo de la empresa                       | 121                     | 12.6 %   | \$ 23 000            |
| Robo de activos (Excepto efectivo) | Robo de activos tangibles que no son dinero en efectivo.      | 156                     | 16.3 %   | \$ 90 000            |

La Tabla 1.1 muestra en un segundo lugar (con 16.3 %) de los casos m1s reportados y con una p1rdida media de \$90 000 al robo de activos tangibles. Estas cifras son preocupantes para cualquier industria porque son costes que se tienen que asumir y por ser activos de la empresa se necesitan reponer, lo que implica, adem1s, esfuerzos en gestiones administrativas. Aunque el dinero es un factor importante, tambi1n el tiempo que se pierde en gestiones de reparaci3n convierte a esta problem1tica en un foco de atenci3n para los ejecutivos de cualquier empresa.

Desde esta perspectiva, existe una problem1tica que afecta a las empresas de l1cteos que requieren refrigeraci3n de sus productos en el punto de venta. Existen empresas de dicha industria que entregan en calidad de pr1stamo un refrigerador exhibidor a terceros para promocionar sus productos y agilizar sus ventas. Sin embargo, es complicado tener un control de estos activos tangibles y no se tiene verdadera certeza de la ubicaci3n de los mismos. En ese sentido, la empresa requiere un sistema de monitoreo y geolocalizaci3n de sus refrigeradores que

<sup>1</sup>La suma excede el 100 % porque varios casos involucraron esquemas de apropiaci3n de m1s de una categor1a.

les permita establecer una geocerca (una cerca virtual delimitada por puntos o coordenadas geográficas) dentro de la cual estará ubicada. En caso el refrigerador sea trasladado fuera de su geocerca, el sistema enviará una alerta a la empresa y se tomarán las acciones correctivas. Adicionalmente, se tendrá integrado un sistema de adquisición de datos, específicamente se enviará de manera periódica (una vez cada hora) el valor de la temperatura interna en la cabina y en el motor. No será necesario enviar periódicamente la geolocalización, a menos que el activo salga de la geocerca. Asimismo, los refrigeradores de esta empresa están distribuidos en la ciudad de Lima Metropolitana, lo que exige una cobertura aproximada a la superficie de la ciudad (2670.4 km<sup>2</sup> según el INEI [6]).

## **1.2. Estado del arte y justificación del estudio**

### **1.2.1. Tecnologías de comunicación inalámbrica disponibles para IoT**

Cuando se habla de Internet de las Cosas (IoT) es lógico pensar que los dispositivos están interconectados a una red que transmite datos mediante alguna tecnología de comunicación. Evidentemente y dado la portabilidad que tienen las “cosas”, esta tecnología requiere ser inalámbrica. Por tanto, es conveniente revisar las tecnologías de telecomunicaciones disponibles en la actualidad y evaluar sus características.

En primer lugar, es necesario definir criterios para la decisión de adoptar un despliegue de red con alguna tecnología inalámbrica específica. Se pueden considerar criterios como la cobertura y alcance de la señal, el ancho de banda, la velocidad de transmisión (Throughput<sup>2</sup>), la potencia y tolerancia al ruido. Sin embargo, es necesario ponderar la importancia de estos criterios pensando en una solución que satisfaga las características de una red IoT. De hecho, la mayoría de dispositivos IoT no necesitan grandes velocidades de transmisión ni un gran ancho de banda. En cambio, es importante manejar una red de gran cobertura, pues IoT trae consigo tendencias de aplicación en conceptos como Smart City (ciudades inteligentes), Smart Grids (redes eléctricas inteligentes), Smart Home (casas inteligentes), IoT for Bussines and Industry (IoT para los negocios y la industria), entre otros. Estos nuevos conceptos tienen en común la necesidad de una red con amplia cobertura. La Figura 1.2 muestra las principales tecnologías inalámbricas según el alcance que soportan aproximadamente.

---

<sup>2</sup>En el contexto de las redes de telecomunicación, el throughput se define como la tasa de mensajes enviados con éxito en un canal de comunicación y se mide generalmente en bits por segundo (bps) o paquetes por segundo (pps)



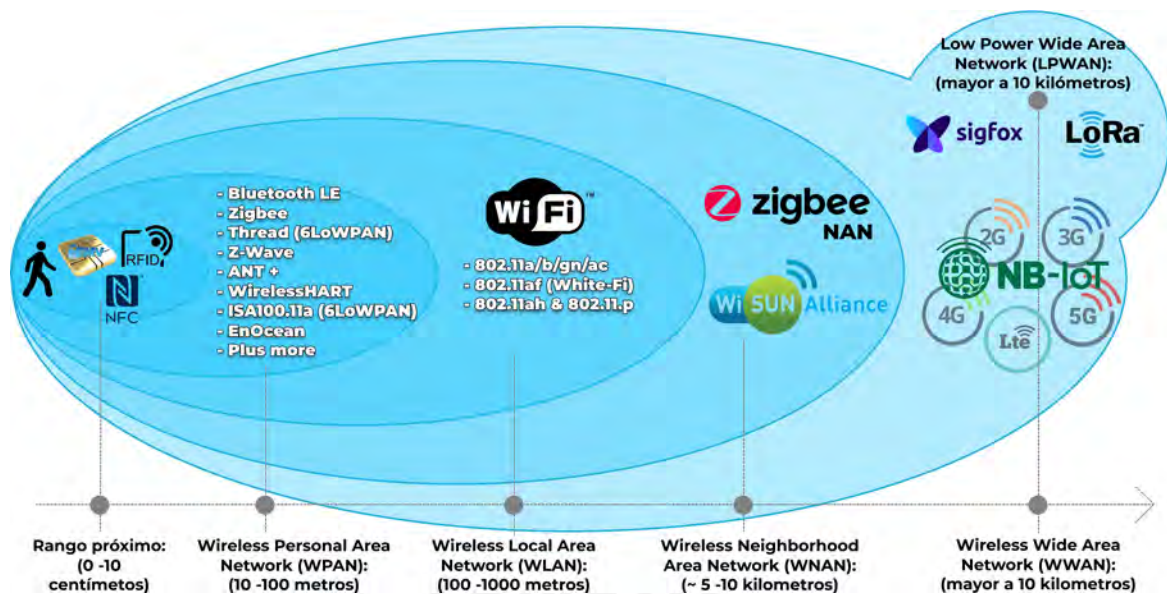


Figura 1.2: Principales redes inalámbricas disponibles actualmente

Desde esta perspectiva, las redes WWAN y LPWAN son las más atractivas para una solución IoT, pues tienen un alcance que supera decenas de kilómetros. Sin embargo, LPWAN se diferencia por ofrecer soluciones de red para dispositivos de bajo consumo de energía eléctrica; es decir, para casos donde alargar la duración de las baterías es crítico y, precisamente, eso es lo que caracteriza a la mayoría de los dispositivos IoT.

### 1.2.2. Sistemas existentes para geolocalización

De acuerdo con lo presentado, las tecnologías 2G, 3G, 4G (repotenciado con el estándar LTE) y 5G son opciones por considerar en ciertas aplicaciones de IoT. Estas redes son generaciones de tecnologías que fueron desarrolladas a lo largo de los últimos años, básicamente, para la telefonía móvil, aunque no están limitadas para el uso exclusivo de estos. La mejora fundamental entre generaciones es la velocidad de transmisión de datos. Asimismo, las últimas generaciones poseen estándares que permiten la localización de sus dispositivos mediante técnicas que no utilizan de forma exclusiva a las antenas de telefonía celular.

Según [7] los estándares de tecnologías para geolocalización correspondientes a la familia 3G son: Cell-ID (y sus variantes), E-OTD, OTDOA, A-GPS (GPS Asistido) e Hybrid (Híbrido). Luego, en [8] se menciona que 4G LTE se basó en estándares de las generaciones previas, pero generaron funciones de geolocalización mejoradas como el geofencing (geocerca). Se presentan como LCS (Location services) y tienen los siguientes estándares:

- E-CID o Enhanced Cell-ID: Cell-ID mejorado

- LTE A-GNSS: No solo soporta A-GPS, sino también la tecnología rusa GLONASS
- OTDOA with Position Reference Signals: OTDOA con señales de referencia de posición
- Híbrido A-GNSS + OTDOA
- LTE Positioning Protocol (LPP)

En cuanto a la nueva tecnología 5G, a pesar de que tiene una primera versión estandarizada (Release 15 - Stand Alone); a la fecha, las primeras redes comerciales se encuentran en inicios de su despliegue. De hecho, aún tiene una fase de desarrollo donde existen propuestas para mejorar la eficiencia de la arquitectura de sistemas de geolocalización, como es el caso del journal [9] publicado por la IEE.

Muchos de los mencionados estándares se pueden lograr porque estas tecnologías tienen altas tasas de transmisión de datos. Sin embargo, cuando se trata de las redes LPWAN, no es el caso. Es por ello que las tecnologías como SigFox o LoRa sugieren realizar diseños a soluciones de geolocalización basados en chips receptores de GNSS (Sistemas Globales de Navegación por Satélite). El más conocido GNSS es el sistema estadounidense GPS; sin embargo, existen otras alternativas como sistema ruso GLONASS, el europeo GALILEO y el chino BeiDou.

Sin embargo, cuando se pretende realizar *tracking* (rastreo) de dispositivos IoT en redes LPWAN, usar GNSS no es la única alternativa. En este contexto, surge la idea de adoptar métodos de geolocalización conocidos e integrarlos con las redes LPWAN. Existe dos cuestiones importantes a evaluar para diseñar soluciones de este tipo: ¿Qué tan crítico es tener precisión en la posición del dispositivo? y ¿Qué tan necesario es tener datos de posicionamiento en tiempo real? Luego de analizar estas preguntas, existen opciones como LPWAN+TDoA y LPWAN+WiFi.

### **1.2.3. Sistemas electrónicos para adquisición de datos**

Los sistemas digitales de adquisición de datos parten de la necesidad de muestrear señales que representan variables físicas del mundo real, para luego procesar estos valores digitales con una computadora. Estos sistemas siguen un proceso que involucra componentes electrónicos en hardware y lógicos en software.

El flujo inicia con un dispositivo conocido como sensor que se encarga de convertir parámetros físicos en señales eléctricas (corriente o voltaje). Luego, un circuito de acondicionamiento de señal adecua lo recibido para que el conversor análogo-digital (del inglés, ADC) se encargue de muestrear y cuantizar la señal en valores digitales (representados en números binarios). Finalmente, estos valores digitales llegan a una computadora que, mediante un

software escrito en algún lenguaje de programación, se encargue de guardar, procesar y/o mostrar en una interfaz de aplicación los datos obtenidos del parámetro físico.

Existen distintas opciones para adoptar un sistema de adquisición de datos. Por ejemplo, el “datalogger” es un dispositivo electrónico de tipo comercial que permite almacenar datos en el tiempo o en relación a su ubicación por medio de sensores propios (de aplicación específica) o conectados externamente (de propósito general). Cuentan con una memoria interna y ofrecen visualizar los datos de distintas maneras, mediante una pantalla integrada o mediante la descarga de los datos en algún software propietario. Generalmente, en el caso de *dataloggers* para un parámetro físico en específico, ofrecen soluciones de análisis y procesamiento de datos en los *softwares* que venden.

Lo que caracteriza a los *dataloggers* es que ofrecen valores de precisión versátiles y ahorro de tiempo en diseño. Sin embargo, es evidente que estos dispositivos están equipados con un microcontrolador; entonces, se puede abordar un diseño propio considerando ciertos criterios, especialmente, en la selección del ADC. Las decisiones de diseño dependerán del comportamiento del parámetro físico a medir, por ejemplo, su retardo frente a cambios; asimismo, de requerimientos como la precisión y sensibilidad del sensor, la frecuencia de muestreo, las tolerancias a temperaturas extremas y al ruido y la resolución que se pretende alcanzar. Entiéndase como resolución a la cantidad de bits que manejará el ADC para muestrear y cuantizar la señal analógica en valores digitales (binarios).

En cuanto a la selección de sensores, depende del tipo de variable física a medir. Para el caso planteado, la temperatura es una variable que tiene una respuesta lenta frente a cambios. En efecto, existen distintas opciones para convertir este parámetro en una señal eléctrica. Básicamente, se busca un dispositivo térmicamente sensible y se tienen las siguientes opciones:

- Termocupla
- Termistor
  - NTC: Con coeficiente de temperatura negativo
  - PTC: Con coeficiente de temperatura positivo
- RTD: Detector de temperatura resistivo

Estas 3 opciones se diferencian por las pendientes que describen sus gráficas de voltaje o resistencia frente a cambios de temperatura. En la Figura 1.3 se muestra, *grosso modo*, lo mencionado:

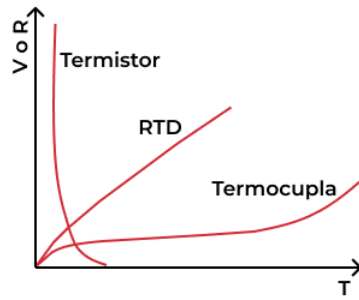


Figura 1.3: Gráfico de diferencias entre dispositivos térmicamente sensibles

### 1.2.4. Arquitecturas de red IoT existentes

Las arquitecturas de red dependen de la solución que se plantea seguir WWAN o LPWAN. Para este caso se presentarán esquemas solamente para LPWAN; es decir, para LoRa y SigFox. En primer lugar, LoRa propone en la Figura 1.4 la siguiente arquitectura de red IoT:

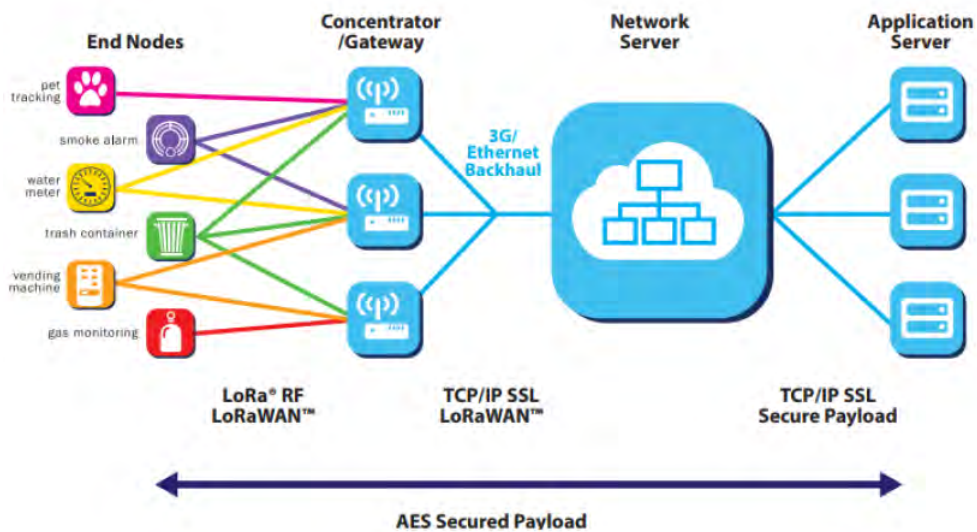


Figura 1.4: Arquitectura de red IoT propuesta por LoRa [10]

Análogamente, SigFox propone en la siguiente arquitectura:



Figura 1.5: Arquitectura de red IoT propuesta por SigFox [11]

En general, en base a las figuras mostradas, se puede afirmar que toda red IoT posee 4 partes fundamentales:

1. Dispositivos conectados (nodos)
2. Gateways
3. Un servidor de *back-end*
4. Servidores de aplicación para el usuario

En efecto, SigFox (Figura 1.5) tiene una arquitectura similar a la de LoRa (Figura 1.4). La principal diferencia entre ambos sistemas es que SigFox te ofrece un *back-end* privado; es decir, te ahorra tiempo en desarrollarlo ofreciéndolo como servicio en su llamado *SigFox CLOUD*. En el siguiente capítulo se analizarán las ventajas y desventajas que tiene este modelo de negocio frente a la alternativa de LoRa. Existen casos de éxito de aplicaciones con redes LPWAN, por ejemplo, en la Figura 1.6 se muestra la arquitectura de un proyecto para monitorear la geolocalización de una manada (ovejas y ganado vacuno).

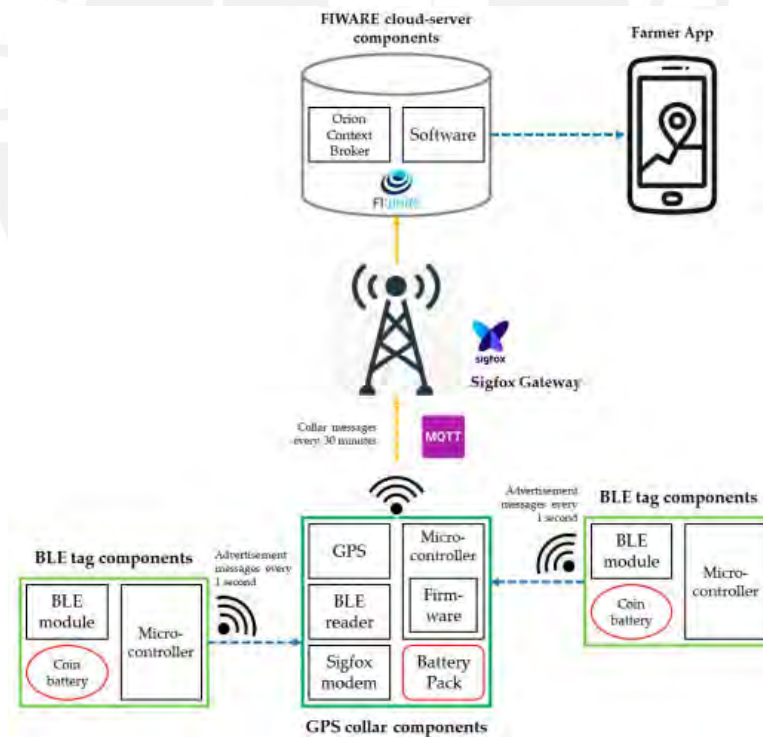


Figura 1.6: Arquitectura de red IoT para una solución planteada en [12]

En [12] se explica que se pretende crear una solución de muy bajo costo. En efecto, se plantea la idea de que algunos animales estén equipados con collares GPS y el resto con tags con comunicación BLE (Bluetooth Low Energy). La idea es que los tags envíen su señal cada

segundo y los collares, que además cuentan con un microcontrolador y transceptor SigFox, calculen la posición relativa y lo envíen al backend como datos. De esta manera, la relación collar/tag define el costo por animal de la solución. Se puede analizar esta arquitectura con las 4 partes básicas planteadas anteriormente. En este caso, la primera parte (Dispositivos conectados) tendría dos capas, los tags BLE (que no están directamente conectados al gateway SigFox) y los collares GPS. Del mismo modo, la última parte (aplicaciones para el usuario) sería su servidor front-end asociado al *app* de *smartphone* para el granjero (usuario final). Este ejemplo evidencia la flexibilidad que se tiene para diseñar redes IoT, aunque siempre se contempla las 4 partes mencionadas.

### **1.3. Objetivos del trabajo de investigación**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Estudiar y proponer el diseño de un sistema de Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo de datos de uso, alertas y geolocalización de refrigeradores para ventas (activos de una empresa) usando la red LoRaWAN

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

1. Analizar y revisar conceptos relacionados a los sensores que son necesarios para abordar la problemática de los refrigeradores de exhibidor.
2. Proponer recomendaciones y criterios para el diseño o selección de los sensores.
3. Comparar las tecnologías de red inalámbrica actuales para IoT.
4. Proponer un modelo de solución de un sistema IoT para abordar la problemática planteada.

## Capítulo 2

# Fundamentos para el desarrollo del diseño

### 2.1. Sistemas Globales de Navegación por Satélite

Se considera un Sistema Global de Navegación por Satélite (por sus siglas en inglés, GNSS) a una constelación de satélites orbitando la tierra que transmiten señales que sirven para calcular el posicionamiento de un receptor en cualquier parte del planeta. Este sistema es vital para que pequeños dispositivos electrónicos determinen su longitud, latitud y altitud/elevación con una alta precisión que depende de la cantidad de señales captadas de los satélites disponibles. Los sistemas GNSS existentes a la actualidad son los siguientes:

- GPS (Global Positioning System): Sistema de origen estadounidense
- GLONASS: Sistema de origen ruso
- GALILEO: Sistema administrado por la Unión Europea
- BeiDou: Sistema de origen chino

Existe una gran variedad de sistemas integrados en un chip (del inglés, System on a Chip - SoC) que son receptores de las señales GNSS. El primer sistema funcional creado es el GPS, este inició con propósitos militares, luego en la década de 1980 fue liberado para uso civil. Según [13], el GPS está compuesto de una constelación nuclear de 24 satélites. Estos satélites siguen órbitas conocidas como MEO (Medium Earth Orbit) con una altitud aproximada de 20200 km. Asimismo, se indica que los satélites GPS transmiten a una potencia de 478.6 Watts (26.8 dBW) con una portadora L1 a 1575.42 MHz. Luego, la señal se degrada por efectos naturales de las

grandes distancias en el espacio libre debido a la dispersión esférica y los efectos de atenuación atmosféricos. Las especificaciones del GPS proporcionan una potencia de recepción mínima en la superficie de la Tierra de  $-160$  dBW ( $-130$  dBm) asumiendo una visión clara del cielo. Por tanto, las antenas de los chips integrados deben tener una alta sensibilidad para trabajar a esa escala de potencia. En la práctica, los módulos receptores de GPS comerciales ofrecen la posibilidad de captar las señales en forma correcta mientras estén fuera de las edificaciones con paredes que degradan más la señal y hacen prácticamente imposible diferenciar la señal del ruido.

## **2.2. Sensores**

### **2.2.1. Acelerómetro**

Los acelerómetros son dispositivos electromecánicos que miden las fuerzas de aceleración en los ejes espaciales. Estas fuerzas pueden ser estáticas, como la fuerza constante de la gravedad, o pueden ser dinámicas, causadas por el movimiento o vibración del dispositivo. Existen dos tipos principalmente, hay de los basados en cristales piezoeléctricos, pero estos son muy grandes; por otro lado, existen los acelerómetros microelectromecánicos (MEMS) que funcionan con el principio de los capacitores. Estos últimos son los mejores para aplicaciones de electrónica en dispositivos portátiles.

Los acelerómetros MEMS tienen algunos parámetros importantes a considerar. En primer lugar, se debe decidir elegir entre un acelerómetro con salida analógica o salida digital. Luego está el número de ejes y el rango de aceleración. Según [14] un acelerómetro con un rango de  $\pm 1.5g$  será más que suficiente para mediciones de gravedad,  $\pm 2g$  para medir el movimiento de un automóvil y al menos  $\pm 5g$  o más para un proyecto que experimente arranques o paradas repentinas. De la misma, se debe tener en consideración la sensibilidad y ancho de banda. El ancho de banda es la frecuencia usada para medir los cambios en la aceleración, entonces la frecuencia del oscilador debe ser mucho mayor que al ancho de banda porque el circuito electrónico debe leer los cambios en la capacitancia más rápido que los cambios de aceleración.

### **2.2.2. Sensor de temperatura**

Existen sensores de temperatura en integrados que dan sus lecturas mediante una salida digital con protocolos como  $I^2C$ , SPI, etc. Básicamente todo microcontrolador moderno soporta este tipo de protocolos de comunicación y leer los valores de temperatura es cuestión de programación. Si bien es cierto, este tipo de sensores ofrecen variedad en cuanto a sensibilidad y precisión que varían según su precio; sin embargo, soportan rangos de temperatura moderados y



no son versátiles en cuanto a su posicionamiento mecánico. Idealmente son pensados para ser soldados en una placa de circuito impreso (PCB) con las pistas de las señales cerca al microcontrolador. Sin embargo, es posible diseñar un sensor de temperatura más flexible al diseño industrial. Para ello se realiza un diseño con resistencias variables térmicamente sensibles. Las resistencias conocidas son: termistores, RTD (*resistance temperature detector*) y termocuplas. En la tabla 2.1 se comparan sus características:

Tabla 2.1: Comparación de características entre elementos térmicamente sensibles

|  | <b>RTD</b>                        | <b>Termocupla</b>                                 | <b>Termistor</b>                |
|--|-----------------------------------|---|---------------------------------|
| <b>Rango de temperatura</b>                | -260 to 850°C<br>(-436 to 1562°F) | -270 to 1800°C<br>(-454 to 3272°F)                | -80 to 150°C<br>(-112 to 302°F) |
| <b>Precio del sensor</b>                   | Moderado                          | Bajo  | Bajo                            |
| <b>Complejidad del sistema</b>             | Moderado                          | Alto  | Moderado                        |
| <b>Estabilidad a largo plazo (@100 °C)</b> | Muy alta<br>(0.05°C/año)          | Baja<br>(variable)                                | Moderada<br>(0.2°C/año)         |
| <b>Sensibilidad</b>                        | Moderada                          | Baja  | Alta                            |
| <b>Linealidad</b>                          | Básicamente lineal                | No lineal   | Exponencial                     |
| <b>Susceptible a ruido eléctrico</b>       | Rara vez susceptible              | Susceptible, requiere compensación por unión fría | Rara vez susceptible            |

En el contexto de esta investigación se recomienda utilizar los RTD por su buena estabilidad a largo plazo y la forma lineal que tienen de variar su resistencia a los cambios de temperatura, lo que hace que la programación sea simple y confiable. Asimismo, el RTD permite que su elección de compra se base más en el diseño mecánico (longitud del cable, tipo sonda, etc) que en parámetros o coeficientes que determinan el comportamiento de la gráfica.

### 2.2.3. Sensor de apertura y cierre de una puerta

Existen distintas maneras de abordar la detección de la apertura y cierre de una puerta. Sin embargo, la forma más simple y práctica es utilizar un interruptor (*switch*). Los interruptores mecánicos por contacto son invasivos, pues requieren rediseñar la estructura de la puerta para fijar sus contactos. En cambio, existen *switches* que se activan por un campo magnético.

El interruptor de lengüeta o *reed switch* consiste en un par de contactos ferrosos encerrados dentro un tubo de vidrio al vacío. Es muy práctico en tamaño, pues el tubo de vidrio puede tener, aproximadamente, 10 mm de largo por 3 mm de diámetro. Luego, en presencia de un campo

magnético los contactos se unen cerrando el circuito eléctrico y se separan al desaparecer el campo magnético. El campo magnético puede ser generado por un imán permanente o por un electroimán.

## 2.3. Low Power Wide Area Network (LPWAN)

Las redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) son tecnologías inalámbricas empleadas en los sistemas IoT. Las tecnologías LPWAN son ideales para conectar dispositivos que envían pequeñas cantidades de datos a larga distancia maximizando el uso de la batería. Las características principales de las tecnologías LPWAN que las hacen adecuadas para el ecosistema IoT son las siguientes [15]:

- **Comunicación de largo alcance:** Habilidad para admitir nodos que están a una distancia mayor o igual a 10 km de la puerta de enlace (*gateway*).
- **Baja velocidad de transmisión de datos:** Generalmente se envían menos de 5000 bits de datos por segundo. Además, se suele enviar entre 20 y 256 bytes por mensaje varias veces al día.
- **Bajo consumo de energía:** Esta característica proporciona una batería de larga duración para los dispositivos. De hecho, con un buen diseño y una buena programación, la duración de la batería puede durar más de 5 años para ciertas aplicaciones.

### 2.3.1. LoRaWAN

La arquitectura de red LoRaWAN se implementa en una topología estrella de estrellas, en la que las puertas de enlace (*gateways*) retransmiten mensajes entre los dispositivos finales y un servidor de red central (servidor de *Back-end*). Los *gateways* están conectados al servidor por Internet a través de conexiones IP estándar y actúan como un puente transparente, pues convierten paquetes transmitidos por modulación LoRa en paquetes TCP/IP y viceversa .

La comunicación inalámbrica aprovecha las características de largo alcance de la modulación LoRa. Debido a su topología, los nodos son capaces de establecer comunicación bidireccional, así como *multicast* para grupos específicos con el fin de hacer un uso eficiente del espectro durante tareas tales como actualizaciones de firmware por aire (FOTA, por sus siglas en inglés) u otros mensajes de distribución masiva [10].

### 2.3.2. SigFox

Sigfox es un protocolo de banda ultra-estrecha (Ultra-narrow band) desarrollado en 2009 en Francia. Esta es una tecnología LPWAN que utiliza las bandas ISM sin licencia para un protocolo patentado.

Emplea una banda de 100 Hz y usa el Espectro Ensanchado de Secuencia Ortogonal (OSSS) para el uplink y 600 Hz usando la Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gaussiana (GFSK) para el downlink. Sigfox envía un paquete corto en un canal aleatorio con un retraso de tiempo aleatorio (500 a 525 ms). Este tipo de codificación se denomina Acceso Múltiple por División de tiempo y Frecuencia Aleatoria (RFTDMA) [16].

En la tabla 2.2 se comparan las características técnicas entre ambas tecnologías:

Tabla 2.2: Comparación de características técnicas entre las tecnologías LoRa y SigFox

| Parámetros / Tecnología        | LoRaWAN   | Sigfox  |
|--------------------------------|---|---|
| Modulación                     | CSS   | BPSK  |
| Frecuencias                    | Bandas ISM no licenciadas (típicamente 868 MHz en Europa / 915 MHz en Norteamérica) | Bandas ISM no licenciadas (típicamente 868 MHz en Europa / 915 MHz en Norteamérica) |
| Ancho de banda                 | 250 KHz / 125 KHz   | 100 Hz  |
| Alcance promedio (zona urbana) | 5 km  | 10 km   |
| Tasa de datos máxima           | 50 kbps   | 100 bps   |
| Operadores de servicio         | Sin restricciones, se puede adquirir un gateway y manejar una red privada           | Un solo proveedor de servicios de red de pago                                       |

Es importante resaltar que LoRaWAN, al no tener un *Back-end* privado, no limita la cantidad de mensajes transmitidos o recibidos por día. En cambio, Sigfox solo permite hasta 140 mensajes por dispositivo diariamente en el *uplink* y un tamaño de carga útil de 12 bytes para cada mensaje (*uplink*) y 8 bytes (*downlink*).

## 2.4. Modelo de solución propuesto

Considerando los fundamentos presentados, se propone en la figura 2.1 un diagrama de bloques del modelo de solución planteada para abordar la problemática:

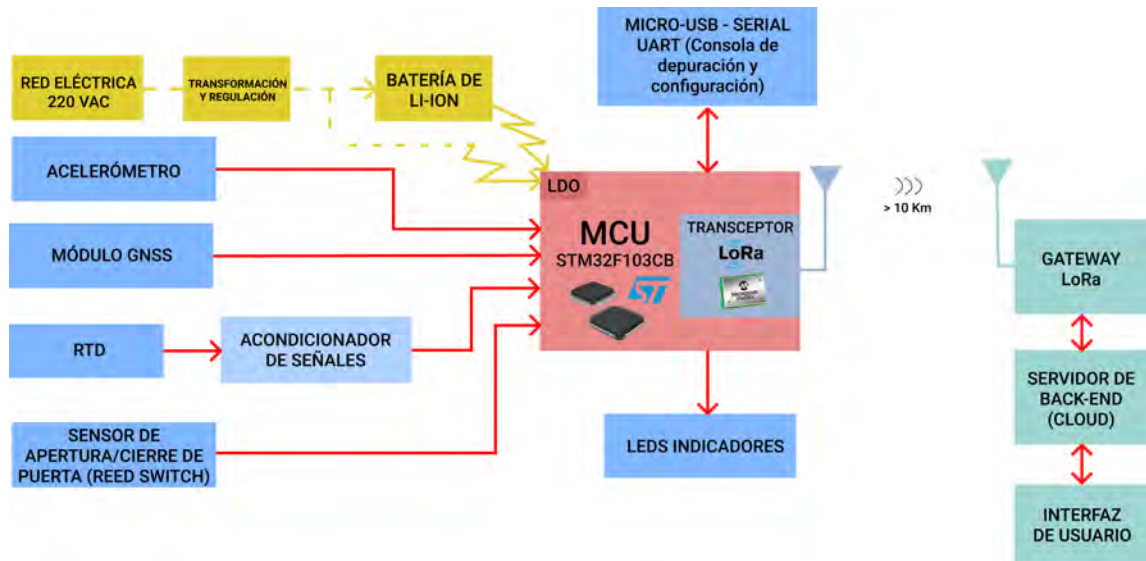


Figura 2.1: Diagrama de bloques de solución propuesta

Notar la importancia de un sistema de depuración y configuración vía USB. Este sistema debe estar orientado en establecer las configuraciones iniciales del *firmware* de cada nodo; por ejemplo, puede plantearse para calibrar los sensores de temperatura, establecer parámetros como *timeouts*, grabar las llaves criptográficas de cada nodo, etc.

# Conclusiones

- Se propone diseñar sensores de temperatura a partir de detectores resistivos (RTD) debido a su flexibilidad para el diseño industrial, escalabilidad y practicidad de implementación por tener un comportamiento lineal. Estos sensores son suficientes para medir tanto la temperatura interna en la cabina del refrigerador como la temperatura en el motor.
- Se requiere una batería que es cargada con la red eléctrica que se comparte con el refrigerador. Esta batería se debe seleccionar con una capacidad suficiente para tener una autonomía de al menos 3 semanas; tiempo suficiente para que la empresa pueda establecer medidas correctivas al recibir la alerta de salida de la geocerca.
- Se requieren algoritmos para administrar las señales del acelerómetro, GNSS, sensor de temperatura y nivel de batería. Estas señales se deben diferenciar en alertas que se envían inmediatamente y datos periódicos que se envían cada hora. Las alertas son: salida de la geocerca, bajo nivel de batería, salida de los umbrales típicos de temperatura del motor o del interior del refrigerador. Asimismo, los datos que se envía periódicamente son: cantidad de veces que se abre y cierra la puerta y valor promedio de temperatura.
- Se propone un sistema IoT mediante la red LoRaWAN debido a su nula limitación en la cantidad de paquetes de datos que se pueden enviar por día. Para ello, es necesario adquirir *Gateways* que se conectan a Internet (vía Ethernet o red celular) y se distribuyen para dar cobertura a los nodos. Un *Gateway* LoRa tiene una antena que brinda más de 10 km de cobertura.
- Se requiere instalar un servidor de *Back-end* para el preprocesamiento, la decodificación y la retransmisión de los paquetes enviados por los *Gateways* a un servidor de aplicación. Asimismo, se propone implementar un servidor de aplicación en la nube (*cloud*) que aloje una plataforma Web tipo dashboard para visualizar tantos los datos periódicos recibidos como las alertas.

# Recomendaciones

- La implementación de la propuesta realizada debe contemplar un sumo cuidado en la programación del microcontrolador; se recomienda energizar los componentes solo cuando sea necesario para ahorrar en el consumo de la batería.
- Seleccionar un módulo receptor GNSS que soporte varios canales y constelaciones de satélites. Esto favorece a reducir el TTFF (*Time To First Fix*); es decir, el tiempo que se demora el receptor en determinar la posición.
- Al comprar los *Gateways* LoRa, se deben adquirir equipos que tengan antenas que trabajen en las bandas no licenciadas del país. En el caso del Perú, se trata de la banda 915 MHz.

# Bibliografía

- [1] D. Chiu Werner, Alexander y Reyes Zamora, *Revolución.PE : La transformación digital de once empresas en el Perú*. Penguin Random House, 2018.
- [2] “The Growth in Connected IoT Devices Is Expected to Generate 79.4ZB of Data in 2025, According to a New IDC Forecast,” tech. rep., International Data Corporation, [En línea]. Disponible en: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS45213219>, junio de 2019. Accedido: 2020-05-10.
- [3] Microsoft, “IoT Signals - Summary of Research Learnings,” tech. rep., Microsoft Corporation, [En línea]. Disponible en: <https://azure.microsoft.com/mediahandler/files/resourcefiles/iot-signals/IoT-Signals-Microsoft-072019.pdf>, julio de 2019. Accedido: 2020-05-02.
- [4] C. Urteaga (Intendente Nacional), “INFORME N°035-2007-SUNAT/2B0000.” [En línea]. Disponible en: <http://www.sunat.gob.pe/legislacion/oficios/2007/oficios/i0352007.htm>, febrero de 2017. Accedido: 2020-03-13.
- [5] Association of Certified Fraud Examiners, “Report to the nations on occupational and abuse: 2010 Global fraud study,” 2010. [En línea]. Disponible en: [https://www.acfe.com/uploadedFiles/ACFE\\_Website/Content/documents/rtn-2010.pdf](https://www.acfe.com/uploadedFiles/ACFE_Website/Content/documents/rtn-2010.pdf). Accedido: 2020-04-12.
- [6] Instituto Nacional de Estadística e Informática, “Perú: Anuario de estadísticas ambientales 2013. Capítulo 1: Territorio y Suelos.” [En línea]. Disponible en: [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1140/cap01.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1140/cap01.pdf), 2013. Accedido: 2020-05-15.
- [7] S. S. Soliman and C. E. Wheatley, “Geolocation technologies and applications for third generation wireless,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, no. 3, pp. 229–251, 2002.

- [8] R. S. Campos, “Evolution of positioning techniques in cellular networks, from 2G to 4G,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2017, 2017.
- [9] J. D. Roth, M. Tummala, and J. C. McEachen, “Efficient System Geolocation Architecture in Next-Generation Cellular Networks,” *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 3414–3425, 2018.
- [10] LoRa Alliance, “What is the lorawan specification?.” [En línea]. Disponible en: <https://loro-alliance.org/about-lorawan>. Accedido: 2020-06-18.
- [11] SIGFOX, “SIGFOX TECHNOLOGY: Sigfox Network Architecture.” YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=7zc6bH-9qZk&ab\\_channel=SIGFOX](https://www.youtube.com/watch?v=7zc6bH-9qZk&ab_channel=SIGFOX), Nov 2016.
- [12] F. Maroto-Molina, J. Navarro-García, K. Príncipe-Aguirre, I. Gómez-Maqueda, J. E. Guerrero-Ginel, A. Garrido-Varo, and D. C. Pérez-Marín, “A low-cost IOT-based system to monitor the location of a whole herd,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 10, 2019.
- [13] A. Brierley-Green, “Global navigation satellite system fundamentals and recent advances in receiver design,” *IEEE Long Island Section*, no. September, 2017.
- [14] B. V. Phillips, “Accelerometers,” *Electronics and Power*, vol. 11, no. 11, p. 385, 1965.
- [15] P. Raj and A. Raman, *The Internet of Things: Enabling Technologies, Platforms, and Use Cases*. Taylor & Francis, CRC Press, 2017.
- [16] P. Lea, *Internet of Things for Architects: Architecting IoT solutions by implementing sensors, communication infrastructure, edge computing, analytics, and security*. Packt Publishing, 2018.