



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA EN SISTEMAS E INFORMÁTICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN SISTEMAS E INFORMÁTICA**

**TEMA: CONTENEDORES DE BASURA INTELIGENTES EMPLEANDO
LA RED LoRaWAN**

AUTOR: FLORES CASTRO, EDWIN GEOVANNY

DIRECTOR: SANG GUUN YOO PH.D.

**SANGOLQUÍ
2020**



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

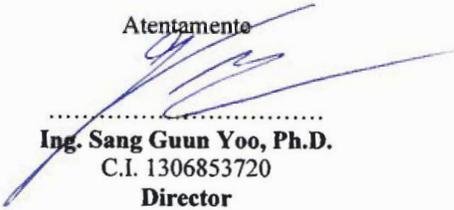
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA EN SISTEMAS E INFORMÁTICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“CONTENEDORES DE BASURA INTELIGENTES EMPLEANDO LA RED LoRaWAN”*** fue realizado por el estudiante ***EDWIN GEOVANNY, FLORES CASTRO***, el mismo que ha sido revisado en su totalidad; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 17 de enero de 2020

Atentamente



.....
Ing. Sang Guun Yoo, Ph.D.
C.I. 1306853720
Director



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA EN SISTEMAS E INFORMÁTICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Flores Castro Edwin Geovanny, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "CONTENEDORES DE BASURA INTELIGENTES EMPLEANDO LA RED LoRaWAN" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas. Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 17 de enero de 2020

Firma:



EDWIN GEOVANNY FLORES CASTRO

C. C. 1900481357



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

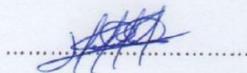
CARRERA DE INGENIERÍA EN SISTEMAS E INFORMÁTICA

AUTORIZACIÓN

Yo, Flores Castro Edwin Geovanny autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "CONTENEDORES DE BASURA INTELIGENTES EMPLEANDO LA RED LoRaWAN" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 17 de enero de 2020

Firma:



EDWIN GEOVANNY FLORES CASTRO

C. C. 1900481357

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación quiero dedicar a mi Dios, quien me ha dado la fortaleza para afrontar los problemas y no desmayar en el camino. Quien nunca me ha abandonado y ha hecho de mí un hombre de bien para la sociedad. Quien me ha guiado por el camino correcto y me ha dado la sabiduría para poder llegar a cumplir mis objetivos.

También quiero dedicar a mis padres; quienes han sido el motor en el día a día para poder llegar a donde estoy. Quienes con su amor y sus consejos han cuidado de mí. Quienes con su enorme esfuerzo me han sabido brindar todo lo necesario para cumplir con mi carrera universitaria. De igual manera, quiero dedicar este trabajo a todas aquellas personas que creyeron en mí y me supieron brindar su ayuda.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, la cual se convirtió en mi segundo hogar y en sus aulas pude formarme profesionalmente. Mi querida universidad que seguramente extrañaré y que me regalo tantos momentos únicos, además me preparó de la mejor manera para afrontar el mundo laboral. De igual manera quiero agradecer a mis maestros quienes con sus cátedras me alimentaron de conocimiento y de valores profesionales, forjándome como un futuro profesional.

Quiero agradecer a mi tutor de trabajo de investigación; Sang Guun Yoo, por ser un excelente maestro y brindarme su tiempo para realizar esta investigación. Quien con su conocimiento, dirección y enseñanzas ha permitido que se cumplan con los objetivos propuestos.

Finalmente quiero agradecer a toda la comunidad de hardware y software libre, quienes con la mentalidad de compartir el conocimiento y experiencias han contribuido a la realización de la presente investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Objetivo General	6
1.4.2. Objetivos Específicos.....	6
1.5. Alcance	7
1.6. Hipótesis de trabajo.....	8
CAPÍTULO II	9
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	9
2.1. Señalamiento de variables.....	9
2.2. Categorización de variables	9
2.2.1. Variable independiente	9
2.2.2. Variable dependiente.....	10
2.3. Tecnologías de la información.....	10
2.3.1. TICS y el medio ambiente.	11
2.4. Redes de datos.....	12
2.4.1. Redes LPWAN.....	12
2.4.1.1. LoRaWAN.	14

2.4.1.1.1.	Arquitectura.	15
2.4.1.1.1.1.	Dispositivos Finales.	16
2.4.1.1.1.2.	Gateway o Puerta de Enlace.....	16
2.4.1.1.1.3.	Servidor de Red.....	16
2.4.1.1.1.4.	Servidor de Aplicaciones.	18
2.4.1.1.2.	Clases de dispositivos.	18
2.4.1.1.2.1.	Clase A.....	19
2.4.1.1.2.2.	Clase B.	19
2.4.1.1.2.3.	Clase C.	19
2.4.1.1.3.	Velocidad de Transmisión de Datos.	19
2.4.1.1.4.	Seguridad.	20
2.4.1.2.	Redes Sigfox.	21
2.4.1.3.	Redes NB-IoT.	22
2.4.1.4.	Comparativa de tecnologías LPWAN.....	23
2.5.	Ciudades inteligentes.	24
2.5.1.	Contenedores de basura inteligentes.....	25
2.5.2.	Principales tipos de residuos.....	26
2.5.3.	Generación de residuos Urbanos.	27
2.6.	Estado del arte.....	28
2.6.1.	Heurística.....	28
2.6.1.1.	Preparación.....	29
2.6.1.2.	Exploración.....	29
2.6.1.3.	Descriptiva.....	29
2.6.1.4.	Recolección.....	30
2.6.1.5.	Selección.....	31
2.6.2.	Hermenéutica.....	33
2.6.2.1.	Interpretación.....	33
2.6.2.2.	Publicación.....	36
CAPÍTULO III		37
DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN		37
3.1.	Metodología Design Science.....	37
3.1.1.	Pautas de la metodología.	37

3.1.1.1.	Diseño del artefacto.	37
3.1.1.2.	Relevancia del problema.	37
3.1.1.3.	Evaluación del diseño.	38
3.1.1.4.	Contribuciones de investigación.	38
3.1.1.5.	Rigor de la investigación.	38
3.1.1.6.	Diseño como proceso de búsqueda.	39
3.1.1.7.	Comunicación de la investigación.	39
3.1.2.	Aplicación de la metodología.	39
CAPÍTULO IV		41
DESARROLLO DE LA PROPUESTA		41
4.1.	Diseño de la arquitectura.....	41
4.1.1.	Nodo recolector de información.	41
4.1.2.	Gateway LoRaWAN	42
4.1.2.1.	Raspberry Pi 3 B+	42
4.1.2.2.	Placa LoRa/LoRaWAN para Raspberry Pi.....	43
4.1.3.	Servidor de Red.....	44
4.1.4.	Servidor de Aplicaciones	45
4.2.	Diseño de los componentes.....	46
4.2.1.	Nodo recolector de información.	46
4.2.2.	Gateway LoRaWAN.....	49
4.2.3.	Servidor de Red.....	50
4.2.4.	Servidor de Aplicaciones.	53
4.2.5.	Cliente.....	54
4.2.5.1.	Componentes de software implementados.....	55
CAPÍTULO V		57
EVALUACIÓN DE RESULTADOS		57
5.1.	Componentes de hardware implementados.....	57
5.2.	Características de la solución	60
5.2.1.	Distancia.	61
5.2.2.	Velocidad.	62
5.2.3.	Consumo energético.....	64
5.2.3.1.	Nodo recolector de información.	64

5.2.3.2.	Gateway.	64
5.3.	Especificaciones técnicas.	65
5.3.1.	Nodo recolector de información.	65
5.3.2.	Gateway.	66
5.4.	Conclusiones.	67
5.5.	Recomendaciones.	69
BIBLIOGRAFÍA		70
ANEXOS		75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Preguntas de Investigación	7
Tabla 2 - Comparativa de redes LPWAN	23
Tabla 3 - Recolección de trabajos relacionados	30
Tabla 4 - Selección de trabajos relacionados	32
Tabla 5 - Tabla de verdad del multiplexor	48
Tabla 6 - Puntos de transmisión	61
Tabla 7 - Tabla de velocidad de transmisión entre el nodo y el gateway	62
Tabla 8 - Consumo energético del nodo recolector de información	64
Tabla 9 - Características técnicas del nodo recolector de información	65
Tabla 10 - Características técnicas gateway	66

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Árbol de posibles problemas	3
<i>Figura 2.</i> Categorización de variable independiente.	9
<i>Figura 3.</i> Categorización de la variable dependiente.....	10
<i>Figura 4.</i> Comparativa de tecnologías inalámbricas.....	14
<i>Figura 5.</i> LoRaWAN Stack	15
<i>Figura 6.</i> Arquitectura LoRaWAN	16
<i>Figura 7.</i> Stack de la plataforma The Things Network.....	18
<i>Figura 8.</i> Arquitectura Sigfox.....	22
<i>Figura 9.</i> Solución inteligente de gestión de residuos	26
<i>Figura 10.</i> Proceso de diseño del estado del arte.....	28
<i>Figura 11.</i> Pasos de la Metodología Design Science.....	40
<i>Figura 12.</i> Arquitectura la solución de contenedores inteligentes usando LoRaWAN	41
<i>Figura 13.</i> Raspberry Pi 3B+	42
<i>Figura 14.</i> Comunicación entre el nodo con el gateway.....	44
<i>Figura 15.</i> Comunicación entre el gateway con el servidor de red.....	44
<i>Figura 16.</i> Comunicación entre el servidor de red con el servidor de aplicaciones.	45
<i>Figura 17.</i> Comunicación entre el servidor de aplicaciones con el cliente.....	46
<i>Figura 18.</i> Sensor ultrasónico HC-SR04	47
<i>Figura 19.</i> Multiplexor 74LS151	47
<i>Figura 20.</i> Modulo GPS Neo 6m	48
<i>Figura 21.</i> Modulo LoRa RFM95.....	49
<i>Figura 22.</i> Formulario de registro de dispositivos en TTN	52
<i>Figura 23.</i> Integración con DataStore.....	54
<i>Figura 24.</i> Documentación de la API del servidor de aplicaciones.....	54
<i>Figura 25.</i> Estado del gateway en The Things Network.....	57
<i>Figura 26.</i> Servicio del gateway ejecutándose en el Raspberry Pi	57
<i>Figura 27.</i> Estado del nodo recolector de información en The Things Network.....	58
<i>Figura 28.</i> Captura de datos del nodo recolector de información.....	58
<i>Figura 29.</i> Paquete visualizado desde el gateway.....	59

<i>Figura 30.</i> Paquete visualizado desde el servidor de red de TTN.	60
<i>Figura 31.</i> Información detallada del paquete visualizado desde el servidor de red.	60
<i>Figura 32.</i> Tiempo vs Distancia de las transmisiones	63

RESUMEN

En el presente trabajo se ha llevado a cabo el desarrollo e implementación de un contenedor de basura inteligente basado en los principios del Internet de las Cosas. El contenedor inteligente está equipado con un nodo recolector de información que tiene sensores de distancia ultrasónicos y un módulo GPS. El funcionamiento se basa en medir la distancia existente entre la parte superior del contenedor y el objeto más cercano dentro del contenedor de basura. Para el despliegue de toda la solución, se empleó una red LoRaWAN con la finalidad de aprovechar su alcance y bajo consumo. Se ha propuesto un modelo de arquitectura que contempla una solución total, tanto en software como en hardware. De igual manera, se ha desarrollado un prototipo que incluye un gateway y un nodo recolector de información de bajo costo. Para comprobar el funcionamiento de los componentes desarrollados, se realizaron pruebas que permitieron determinar la distancia máxima de cobertura de transmisión, velocidad de transferencia y el consumo de energía de la solución. También se desarrolló una plataforma web, en la cual el usuario pueda ingresar a visualizar en un mapa la ubicación del contenedor y la capacidad disponible. Los resultados obtenidos demostraron que la solución implementada provee largo alcance y una velocidad de transferencia que cumple las características de una red LoRaWAN.

PALABRAS CLAVE:

- **CONTENEDORES DE BASURA**
- **LORAWAN**
- **CIUDADES INTELIGENTES**
- **GATEWAY**

ABSTRACT

In the present work, the development and implementation of an intelligent garbage container based on the principles of the Internet of Things has been carried out. The smart container is equipped with an information gathering node that has ultrasonic distance sensors and a GPS module. The operation is based on measuring the distance between the top of the container and the nearest object inside the garbage container. For the deployment of the entire solution, a LoRaWAN network was used in order to take advantage of its benefits such as long range communication and low energy consumption. An architecture model has been proposed that contemplates a total solution including both software and hardware components. Similarly, a prototype composed of a gateway and low-cost information collection node were developed. To verify the operation of hardware components, functional tests were executed which allowed to determine the maximum transmission distance, transfer speed and level of energy consumption. A web platform was also developed, on which, the user can visualize the location and available capacity of the container over a map. The results showed that the implemented solution provides long range coverage and a transfer speed that meets the characteristics of a red LoRaWAN.

KEYWORDS:

- **DUSTBIN**
- **LORAWAN**
- **SMART CITIES**
- **GATEWAY**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Las ciudades inteligentes han cambiado drásticamente el suministro de infraestructura y los servicios que se ofrecen a los ciudadanos empleando principalmente las tecnologías de la información. Este tipo de ciudades tienen el objetivo de generar un entorno inteligente que contribuya a la mejora del nivel de vida de sus ciudadanos. Es por ello que las tecnologías de la información se han convertido en algo necesario para lograr el desarrollo urbano y buscar mejorar los servicios tradicionales, con la finalidad de que estos sean eficientes y sostenibles en el ámbito ambiental, económico y energético (Raut & Devane, 2018).

Las ciudades inteligentes buscan dotar de un entorno limpio y cómodo para sus habitantes, para ello se propone una gestión de residuos que funcione de manera eficaz y que genere el menor impacto ambiental posible. Sin embargo, esta tarea puede volverse compleja, debido a que casi todas las actividades que realiza el ser humano generan residuos y si se añade el crecimiento poblacional, da como resultado que la gestión de residuos en algunos países se vuelva inmanejable, causando molestias y hasta enfermedades en los ciudadanos (Dasy Gualichicomín, 2018).

Una alternativa para brindar una solución óptima en lo que se refiere a la gestión de residuos podría ser el internet de las cosas. La idea se basa principalmente en el monitoreo del contenedor de basura desde el internet, no obstante; hoy en día hay muchas discusiones sobre las limitantes que pueda tener el IoT (Internet of Things). Una de estas limitantes es cómo lograr una mejor autonomía energética en los dispositivos IoT, para lo cual surgen protocolos de comunicación de bajo consumo energético, uno de ellos es el protocolo LoRa, el cual garantiza rendimiento, alcance y bajo consumo energético. Estas características hacen que LoRa sea una alternativa viable para realizar propuestas basadas en IoT orientadas hacia las ciudades inteligentes (Lavric & Popa, 2017).

El internet de las cosas ha revolucionado el internet tradicional; en el cual se ofrecían servicios orientados únicamente a las personas. Sin embargo, el internet de las cosas tiene como finalidad que los objetos cuenten con la capacidad de conectarse y comunicarse usando el Internet. Existen aplicaciones que conjugan el internet de las cosas con las ciudades inteligentes, un claro ejemplo son los sistemas de gestión inteligentes del agua (Khutsoane, Isong, & Abu-Mahfouz, 2017); los cuales se caracterizan por tener una alta eficiencia energética junto con una comunicación que cubra grandes distancias, dando lugar al uso de tecnologías de red amplia de baja potencia como LPWAN para cubrir las demandas actuales de la sociedad.

Dentro de las redes LPWAN, se encuentra LoRaWAN como una alternativa. LoRaWAN es una especificación de redes LPWAN. Esta especificación es de capa de enlace de datos según modelo OSI y para la capa física emplea la tecnología de modulación LoRa; esta puede ser empleada en una amplia gama de frecuencias que pertenecen al espectro ISM (Industrial, Scientific and Medical) por lo cual no se requiere licencia para su implementación y experimentación, sacando una ventaja notable con otras tecnologías LPWAN, como, por ejemplo; Sigfox que tiene licencia de uso ya que es propietaria. Las frecuencias en la cuales trabaja LoRa pueden ser 169 MHz, 433 MHz, 868 Mhz y 915 Mhz (“LoRaWAN y LoRa,” 2019).

1.2. Planteamiento del problema

La gestión de residuos es una actividad que al realizarse mediante los métodos tradicionales de recolección puede resultar compleja. A tal punto, que es común encontrar contenedores al borde de su capacidad máxima de almacenaje, dando como resultado que los habitantes dejen las bolsas de basura en el suelo. Esto genera un ambiente propicio para los perros rompan las bolsas en busca de comida, haciendo que los residuos queden dispersos en el suelo y llamen la atención de roedores y demás animales. Algunos países como Argentina han tomado iniciativas para tecnificar todo el proceso de recolección de residuos mediante la optimización de las rutas de los camiones recolectores de basura (Infobae, 2019), sin embargo; los contenedores al borde su capacidad sigue siendo un problema.

El problema radica en la acumulación de basura tanto en los contenedores como en el suelo. Esto se da debido a que no se cuenta con un método para conocer la capacidad de los contenedores de basura para que un camión recolector pueda dirigirse hacia él y proceder al vaciado de los residuos. De esta manera se podrá realizar una mejor planificación de las rutas. Cabe recalcar que los contenedores de basura se encuentran a la intemperie y en muchos de los casos el acceso a la energía eléctrica es restringido, lo cual hace que algunas de las tecnologías actuales no contribuyan con la solución de este problema por cuestiones de alcance y consumo de energía. En la figura 1, se muestran las posibles causas y sus efectos del problema de la acumulación de basura.

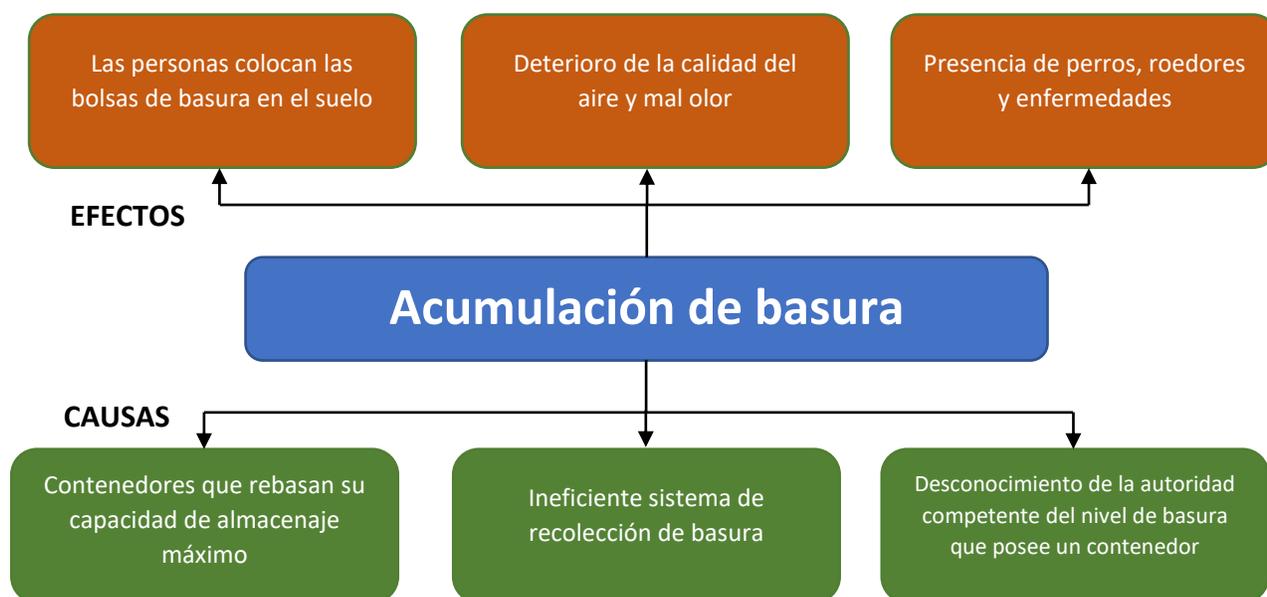


Figura 1. Árbol de posibles problemas

1.3. Justificación

El problema de la acumulación de residuos es un problema que difícilmente se lo resolverá con contenedores de basura más grandes o mayor cantidad de camiones recolectores de basura. Cada vez es más común ver desperdicios botados alrededor de los contenedores de basura y roedores en medio de estos residuos en plena ciudad, adicional a eso se genera un entorno insalubre lleno de mal olor; en donde abundan las infecciones hacia las personas que transitan por el lugar o viven por sus alrededores.

La solución puede estar en las ciudades inteligentes, ya que estas tienen como objetivo la gestión eficiente de los recursos con la finalidad de hacer mucho más cómoda y segura la vida del ser humano (Idwan, Zubairi, & Mahmood, 2016a). Para hablar de ciudades inteligentes es necesario hablar del internet de las cosas y como puede contribuir a mejorar la vida de las personas. Mediante el internet de las cosas se busca dotar de sensores a los objetos, los cuales les permitan monitorear y controlar ciertas acciones con la finalidad de que la toma de decisiones sea más sencilla a partir de toda la información generada o capturada por los objetos (Draz, Ali, Khan, Majid, & Yasin, 2018).

Algunas de las soluciones de IoT que contribuyen a la gestión eficiente de los residuos en los contenedores (Memon, Shaikh, Mahoto, & Memon, 2019), tienen como método de comunicación GSM o WiFi, lo cual tiene limitaciones en lo que se refiere a consumo de energía y alcance, además hace muy difícil la implementación en condiciones reales, ya que en una ciudad hay miles de contenedores de basura y para cada uno de ellos se debería dar una conexión GSM o WiFi. Además; es necesario que se encuentren conectados siempre a la energía eléctrica.

Ante el problema propuesto se necesita de una solución que priorice el largo alcance y el bajo consumo de energía. De igual manera es necesario que esta solución esté encaminada en la disminución máxima de los costos de implementación y uso. Para lo cual el empleo de una red LoRaWAN es una alternativa que cumple con lo antes mencionado, en lo referente a distancia y consumo energético, sin dejar de lado la parte económica. Ya que una red LoRaWAN no necesita de una licencia para su uso y en la actualidad se puede elaborar todos los componentes que se requiere para la arquitectura de la solución sin necesidad de invertir grandes cantidades de dinero.

Esta solución está plenamente justificada y se alinea con los principios de las ciudades inteligentes ya que resuelven una problemática actual de manera eficiente y sostenible priorizando el consumo energético que implica al emplear una red LoRaWAN. La creación de una solución mucho más aplicable al contexto real puede ser el primer paso para la conversión de ciudades tradicionales a ciudades inteligentes.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un prototipo de sistema de monitoreo para contenedores de basura de bajo consumo energético mediante el uso de una red LoRaWAN.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis de las investigaciones similares que busquen solucionar el problema de la acumulación de residuos en los contenedores mediante una revisión de literatura.
- Implementar un prototipo de medición de nivel de basura en contenedores que incluya un gateway y de sensores LoRaWAN de bajo costo.
- Evaluar el funcionamiento y características del gateway y de los sensores LoRaWAN implementados, mediante pruebas de rendimiento que permitan evidenciar sus especificaciones técnicas.
- Exponer los resultados obtenidos mediante la elaboración de fichas de datos para el gateway y los sensores LoRaWAN con la finalidad de conocer sus características y limitantes.

1.5. Alcance

Esta investigación busca solucionar el problema de la acumulación de basura, para lo cual se pretende realizar un sistema basado en IoT para el monitoreo de manera periódica del nivel de basura que tenga un contenedor. Se realizará la implementación de un gateway que permitirá la interconexión entre los dispositivos LoRa e internet. Además, se implementará el módulo que sea compatible con la red LoRaWAN, mismo que permitirá la medición del nivel de basura en los contenedores. Estos dos componentes esenciales deberán funcionar sobre una red LoRaWAN y permitirán la convergencia con la nube mediante una aplicación web sencilla que permita realizar el monitoreo y lectura de estado de los contenedores. Todo lo antes mencionado estará plasmado en una arquitectura que explicará el funcionamiento de cada componente.

Para delinear de forma adecuada el alcance de la investigación planteada, se proponen varias preguntas de investigación asociadas a los objetivos específicos, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1

Preguntas de investigación

OBJETIVOS ESPECIFICOS	PREGUNTAS DE INVESTIGACION
OE1. Realizar un análisis de las investigaciones similares que busquen solucionar el problema de la acumulación de residuos en los contenedores mediante una revisión de literatura.	<p>RQ1(OE1): ¿Que soluciones existen referentes al tema de la gestión de residuos?</p> <p>RQ2(OE1): ¿Qué tipos de redes de datos emplean las soluciones actuales a la problemática propuesta?</p>
OE2. Implementar un prototipo de medición de nivel de basura en contenedores que incluya un de gateway y de sensores LoRaWAN de bajo costo.	<p>RQ3(OE2): ¿Que módulos de hardware se emplearán para medir el nivel de basura y para la construcción del gateway?</p> <p>RQ4(OE2): ¿Cuáles son las herramientas de software más eficientes para implementar la presente investigación?</p>

CONTINÚA 

OE3. Evaluar el funcionamiento y características del gateway y de los sensores LoRaWAN diseñados, mediante pruebas de rendimiento para comparar con soluciones similares que emplean otro tipo de red.

RQ5(OE3): ¿Cuál será el alcance máximo de esta red?

RQ6(OE3): ¿Cuál será la velocidad de transmisión de datos en la red planteada?

OE4. Exponer los resultados obtenidos mediante la elaboración de fichas de datos para el gateway y los sensores LoRaWAN con la finalidad de conocer sus características y limitantes.

RQ7(OE4): ¿La solución cumple con los requisitos mínimos de una arquitectura LoRaWAN?

RQ8(OE4): ¿Cuánto costaría el gateway y los sensores implementados?

1.6. Hipótesis de trabajo

Los contenedores de basura inteligentes evitan la acumulación de basura.

- **Variable dependiente:** Nivel de basura acumulado.
- **Variable independiente:** Contenedor de basura inteligente.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1. Señalamiento de variables

- **Variable dependiente:** Nivel de basura acumulado.
- **Variable independiente:** Contenedor de basura inteligente.

2.2. Categorización de variables

2.2.1. Variable independiente

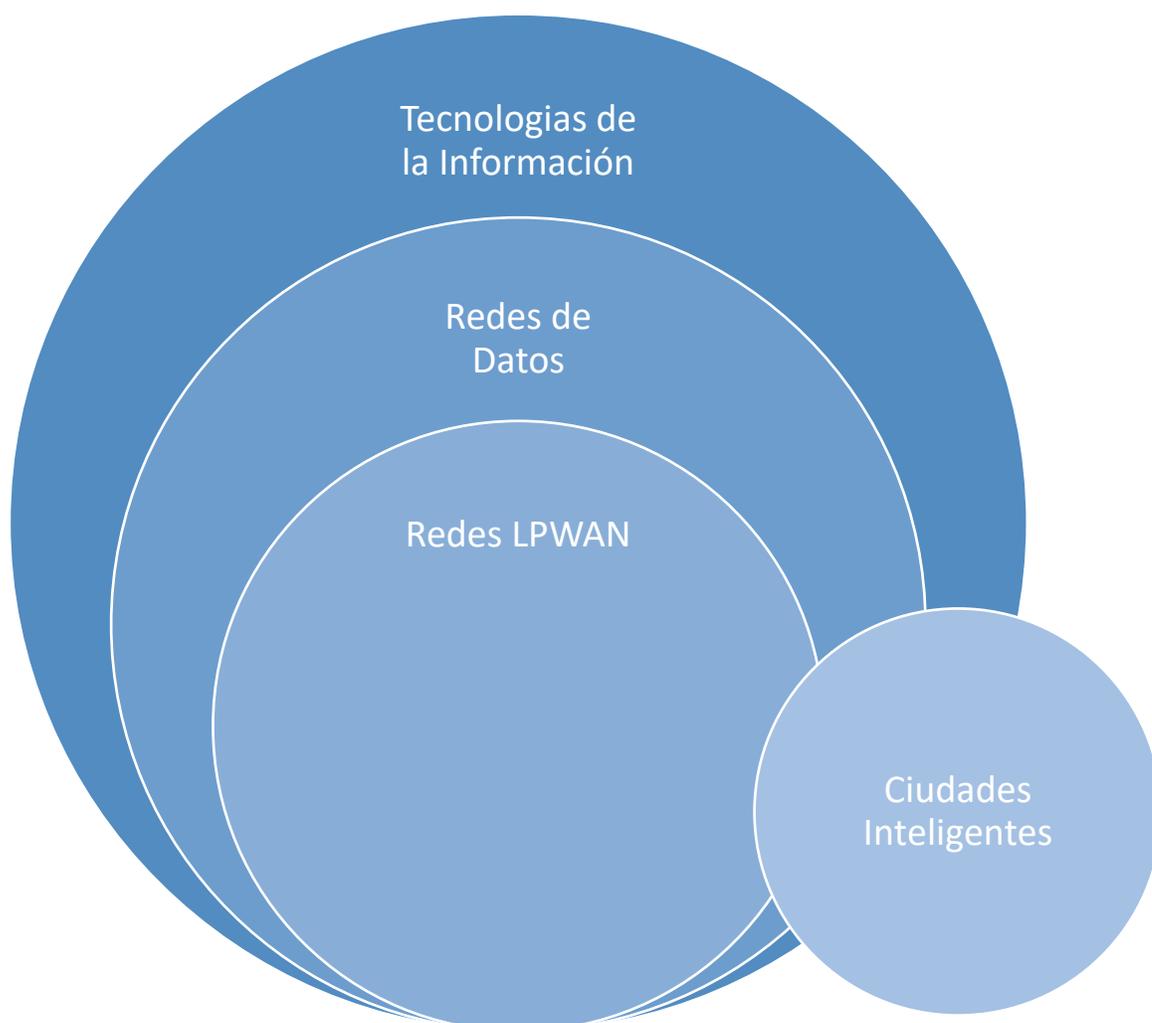


Figura 2. Categorización de variable independiente.

2.2.2. Variable dependiente

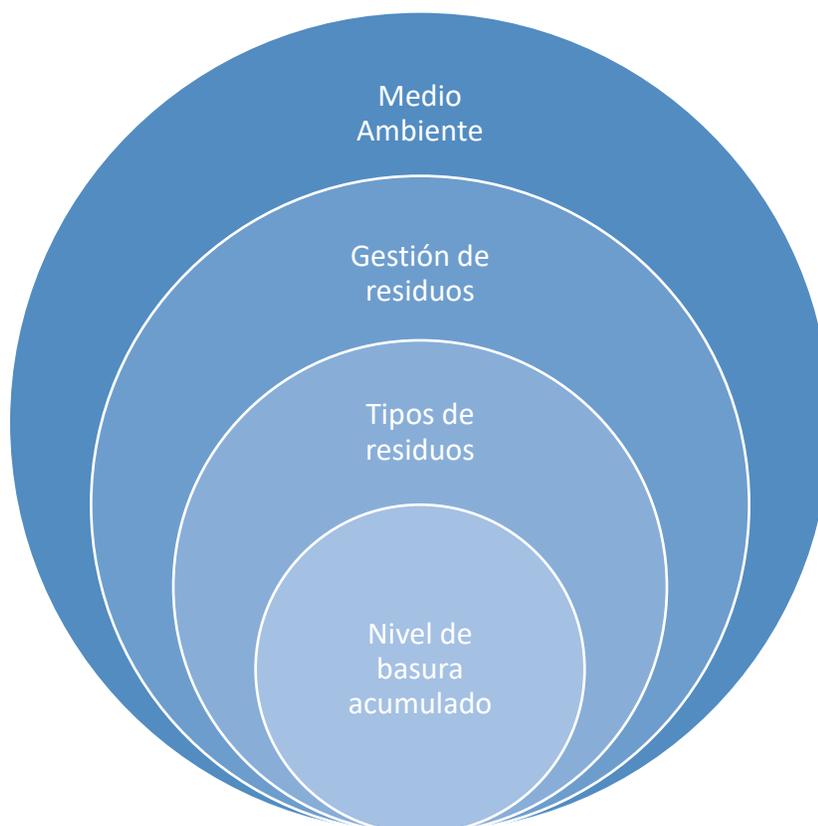


Figura 3. Categorización de la variable dependiente.

2.3. Tecnologías de la información.

Las tecnologías de información hacen referencia al conjunto de dispositivos, servicios y actividades que son apoyadas principalmente por un computador, y se basan en la transformación de la información; la cual se la conoce como información digital. Dentro de estas también se encuentra la radio y la televisión, siempre y cuando sean digitales, ya que su funcionamiento se basa en la generación de secuencias numéricas que representan tanto el sonido como la imagen original (Vasconcelos Santillán, 2015).

Las TICs (Tecnologías de la Información y Comunicación) se han desarrollado en base a los avances científicos generados en los ámbitos de la informática y las telecomunicaciones. En líneas generales las TICs son un conjunto de tecnologías que permiten la producción, tratamiento y acceso a la información presentada en diferentes formatos, estos formatos pueden ser; texto, sonido,

imagen, etc. Uno de los elementos más representativos de las TICs es la computadora, y con la llegada del Internet se dio un gran salto, cambiando drásticamente los modos de conocer y relacionarse con otras personas (Ortí, 2011).

Según Cabero; las tecnologías de la información y comunicación giran alrededor de tres medios básicos; la informática, la microelectrónica y las telecomunicaciones. Sin embargo, no giran únicamente de forma aislada, sino que actúan de manera interactiva e interconectadas, esto da como resultado nuevas realidades comunicativas (Cabero, Duarte, & Barroso, 2006).

2.3.1. TICS y el medio ambiente.

En la actualidad las tecnologías de la información y de las comunicaciones son fundamentales para todas las áreas de la sociedad. Para el cuidado y preservación del medioambiente las TICs se han convertido en un factor esencial, de igual manera para ayudar en las catástrofes naturales. El uso de las TICs permite a los países adaptarse y prepararse para el cambio climático, para ello; es fundamental tomar medidas para mitigar sus efectos y contribuir a la planificación de un futuro (CEPAL, 2015).

En la III Conferencia Ministerial sobre la sociedad de la información de América Latina y el Caribe que se llevó acabo en Lima, Perú en el año 2010. Los países de la región acordaron como uno de sus lineamientos “promover el uso de las TICs para mitigar el cambio climático”. Esto se da gracias a la gran utilidad que pueden tener las TICs para monitorear, mitigar y adaptarse a los efectos del cambio climático (CEPAL, 2015).

El uso de las TICs brinda grandes oportunidades para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, también permite la generación de energía, transporte, eliminación de desechos y construcción. De igual manera las TICs reducen la necesidad en el sector manufacturero, ya que puede reemplazar bienes materiales por productos virtuales. Sobre las TICs se pueden sustentar proyectos de gobernanza, educación y salud, ya que mediante estas se puede llegar a más miembros de la comunidad. Además, son muy útiles para el monitoreo ambiental y climático, esto contribuye de manera efectiva a las comunicaciones de alertas y mitigación en caso de emergencia (CEPAL, 2015).

2.4. Redes de datos.

Es un proceso de comunicación electrónica que permite el intercambio de datos entre un determinado conjunto de dispositivos. Para el funcionamiento de las redes de datos se requiere de hardware y software necesario para conectar a los equipos (Vallina & Miguel, 2013). Una red es la interconexión física o inalámbrica que permite enlazar varios dispositivos informáticos (computadores, teléfonos inteligentes, tabletas, periféricos, entre otros dispositivos), con la finalidad que se comuniquen entre sí, de tal manera que puedan compartir datos y ofrecer servicios (Cisco, 2019).

2.4.1. Redes LPWAN.

Las redes de área amplia de baja potencia o por sus siglas en inglés “Low-Power Wide-Area Network” son redes que brindan un bajo consumo de potencia en una área de cobertura de larga distancia. Estas redes surgen como solución a las necesidades planteadas por el Internet de las Cosas. Este tipo de redes se caracterizan por su simplicidad al momento de enviar un mensaje para comunicarse con un dispositivo, además de ofrecer un largo alcance priorizando el bajo consumo de energía. En pocas palabras las redes LPWAN; envían y reciben pequeñas tramas que contienen información en intervalos de tiempo poco frecuentes o periódicos (Valarezo & Criollo, 2017).

Debido al gran crecimiento de las tecnologías de IoT (Internet of Things), se puede encontrar un número creciente de aplicaciones prácticas en muchos campos (seguridad, seguimiento de activos, agricultura, medición inteligente, ciudades inteligentes, etc.); estas aplicaciones IoT tienen requisitos específicos como largo alcance, baja tasa de datos, bajo consumo de energía y bajo costo. Las tecnologías de radio de corto alcance como ZigBee, Bluetooth, etc., no están adaptadas al requerimiento de transmisión de largo alcance, mientras que las soluciones basadas en comunicaciones celulares (2G, 3G y 4G) pueden proporcionar una mayor cobertura, pero consumen demasiada energía del dispositivo para la comunicación. Por esto, los requisitos de las aplicaciones de IoT han impulsado el surgimiento de la tecnología de comunicación inalámbrica Low Power Area Network (LPWAN), término genérico para un grupo de tecnologías que hacen posible las comunicaciones de área amplia a bajo costo y menor consumo de potencia (González, 2019).

El objetivo de las redes LPWAN es proporcionar una red de baja potencia para dispositivos pequeños que pueden actuar como medidores o sensores inteligentes. LPWAN está ganando cada vez más popularidad en el sector industrial y de investigación debido a sus características de comunicación de bajo consumo, largo alcance y bajo costo. Estas tecnologías proporcionan comunicación de largo alcance hasta 10-40 km en zonas rurales y 1-5 km en zonas urbanas. Además, son altamente eficiente en términos de energía (más de 10 años de vida útil de la batería) y económicas. En resumen, LPWAN es altamente adecuado para aplicaciones de IoT que solo necesitan transmitir pequeñas cantidades de datos a larga distancia, mientras que las tecnologías de acceso como Bluetooth, Zigbee y Wi-Fi están orientando su explotación a aplicaciones más exigentes (González, 2019). Dentro de sus principales características encontramos:

- **Baja potencia:** Permite que los dispositivos que se encuentren conectados a una red LPWAN puedan trabajar con pequeñas baterías y que la duración de estas baterías pueda prolongarse por algunos años según el tipo de batería.
- **Área Amplia:** La distancia de cobertura de una red LPWAN es mayor a otras tecnologías, llegando a superar los 2 Km en áreas urbanas densamente pobladas.
- **Bajo Costo:** Los dispositivos que conforman una arquitectura LPWAN se puede fabricar con un bajo costo, de igual manera la implementación conlleva un costo muy bajo.
- **Bajo Consumo:** Los dispositivos pueden tener un consumo eléctrico que se encuentre por debajo de los 50 μ Watts. Lo cual permite tener dispositivos conectados durante largos periodos de tiempo sin necesidad de reemplazar la batería.

Con la aparición de las redes LPWAN se dio lugar a desarrollo de otras tecnologías de este tipo, a tal punto que generó un amplio mercado de negocio y un abanico de posibilidades a la hora de elegir una tecnología LPWAN. Las ventajas que ofrece LPWAN han hecho que se convierta en una opción notable a la hora de implementar una solución de Internet de las cosas.

En la figura 4, se muestra las diferentes tecnologías inalámbricas en relación con su alcance y al ancho de banda empleado. Se puede ver como las redes LPWAN ofrecen características interesantes en los puntos clave del Internet de las cosas; como lo es; el consumo de energía y la cobertura.

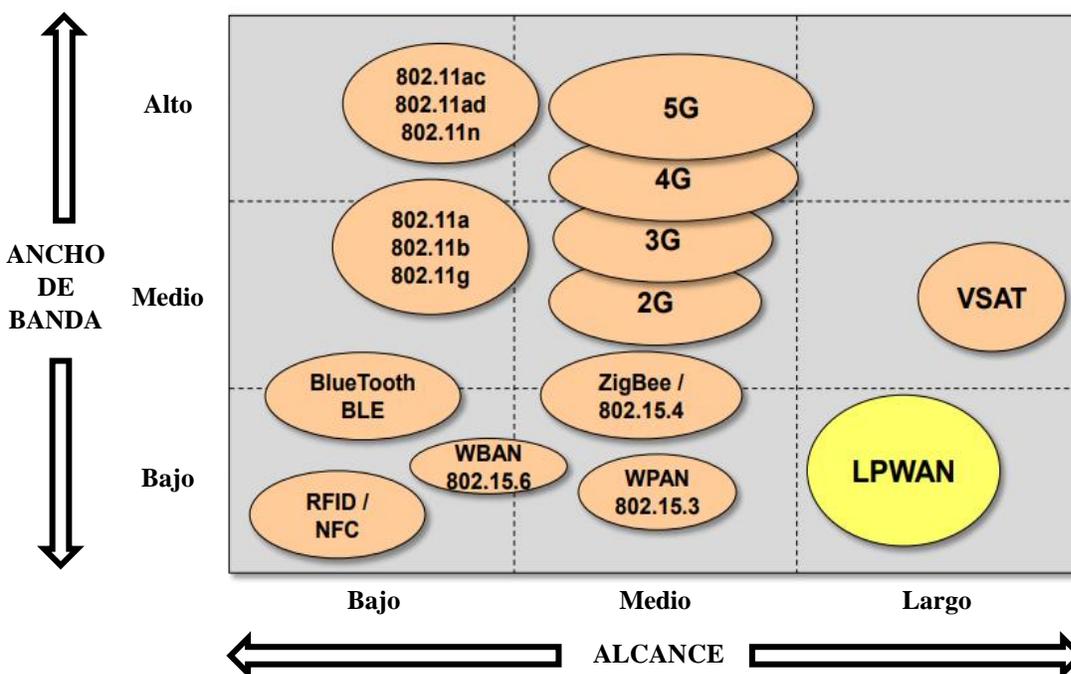


Figura 4. Comparativa de tecnologías inalámbricas.

Fuente: (Egli, 2015).

2.4.1.1. LoRaWAN.

LoRaWAN es una especificación de las redes LPWAN diseñado para conectar de manera inalámbrica dispositivos a Internet o una red privada. Su enfoque es cubrir los requerimientos del Internet de las cosas, como, por ejemplo; comunicación direccional, seguridad de extremo a extremo, localización y movilidad. LoRaWAN es desarrollado y mantenido por LoRa Alliance; esta es una asociación abierta de miembros colaboradores (Cárdenas, González, & Retamal, 2018).

LoRaWAN es una especificación de capa 2 o enlace a datos según el modelo OSI, y usa LoRa para la capa física. LoRa es un protocolo de comunicación empleado en tecnologías LPWAN. Emplea la modulación de radiofrecuencia patentado por Semtech. Esta tecnología

de modulación lleva el nombre “Chirp Spread Spectrum” y opera en la banda ISM o por sus siglas (Industrial, Scientific and Medical). ISM es el nombre que se les da a las frecuencias para que puedan ser usadas sin necesidad de licencia y reservadas a nivel internacional para uso no comercial, únicamente se la puede usar en áreas industriales, científicas y médicas (Cárdenas et al., 2018).

En la figura 5, se puede ver el que LoRaWAN en la capa física emplea la modulación LoRa, mientras que en la capa de enlace a datos LoRaWAN define su propio protocolo MAC (Media Access Control). En esta sección LoRaWAN posee 3 opciones de protocolo MAC, lo cual hace que existan diferentes clases de dispositivos dentro de una red LoRaWAN (Semtech, 2019).

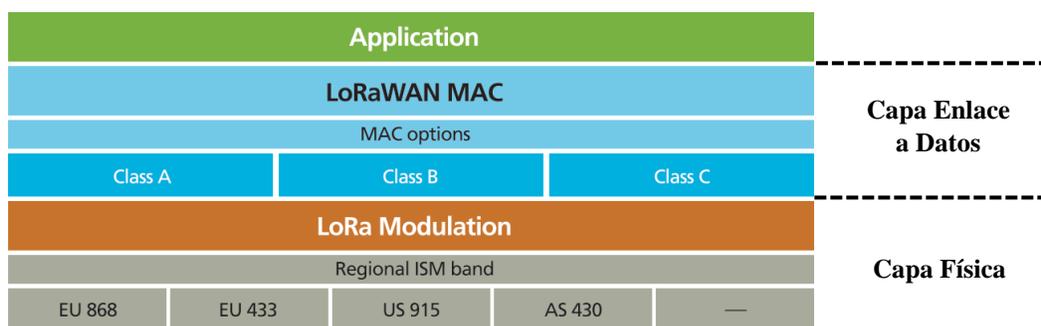


Figura 5. LoRaWAN Stack

Fuente: (Semtech, 2019)

2.4.1.1.1. Arquitectura.

La arquitectura de una red LoRaWAN se implementa en una topología de tipo estrella, ya que los gateways retransmiten los mensajes entre los dispositivos finales y el servidor de red central. De manera general se puede decir que para lograr la comunicación entre los dispositivos finales y los gateways se aprovecha la comunicación inalámbrica LoRa, y los gateways se encuentran conectados al servidor de red mediante conexiones IP y viceversa. El gateway actúa como un puente transparente que convierte los paquetes RF en paquetes IP. En la figura 6, se muestran todos los componentes que forman parte de una arquitectura de una red LoRaWAN (LoRa-Alliance, 2015a).

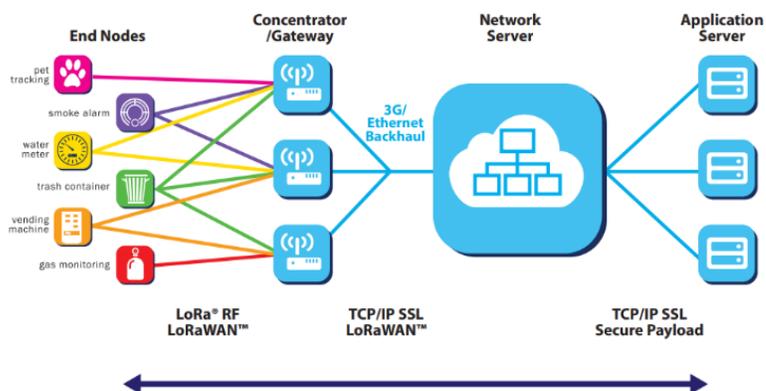


Figura 6. Arquitectura LoRaWAN

Fuente: (LoRa-Alliance, 2015a).

2.4.1.1.1.1. Dispositivos Finales.

Los dispositivos finales pueden ser sensores que capturan y transmiten los datos hacia los gateways (Semtech, 2019). Estos dispositivos pueden fabricarse empleando un módulo LoRa y una tarjeta de desarrollo como, por ejemplo; un Arduino o un ESP32 e incluso una Raspberry Pi.

2.4.1.1.1.2. Gateway o Puerta de Enlace.

Los gateways son enrutadores equipados con un concentrador LoRa; el cual permite enviar y recibir paquetes LoRa y reenviarlos al servidor de red mediante conexión IP. En la actualidad se puede encontrar estos dispositivos de venta, listos para conectarse y trabajar, sin embargo existe la posibilidad de construir uno empleando hardware y software, lo cual reduce costos notablemente (TTN, 2019a).

2.4.1.1.1.3. Servidor de Red.

El servidor de red recibe los paquetes enviados por los gateways. Es el encargado de la administración de la red y realizar las siguientes funciones (Semtech, 2019):

- Desduplicación de datos.
- Control de velocidad adaptativo.
- Administración de tráfico.
- Activación por aire.

En la actualidad la plataforma The Things Network (TTN), permite conectar los gateways con el servidor de red provisto por ellos. Esta plataforma provee un conjunto de herramientas abiertas y una red global abierta para construir aplicaciones de IoT, brindando seguridad y escalabilidad. The Things Network posee más de 90 mil usuarios, más de 9 mil gateways funcionando en un total de 147 países.

|

Dentro de esta plataforma, el servidor de red se puede implementar como Software como Servicio o “SaaS”, nube privada, nube local y como una red pública, esta última es una opción gratuita que evita la implementación, configuración y costos que incluyen el tener un servidor funcionando. Sin embargo; la ventaja no solo es esa, ya que al ser una red global abierta pero muy segura, pone a disposición todos los gateways para que los dispositivos finales pueda emplearlos de manera transparente. Es decir; colocar un gateway en la plataforma de TTN no tiene costo en una red pública, pero hace que el dispositivo esté a disposición del propietario de este y de todos los usuarios registrados en la plataforma. Por lo cual, para realizar una solución IoT en TTN, no siempre se requiere de implementar un gateway, ya que se puede usar uno cercano siempre y cuando esté funcionando (TTN, 2019b).

Otra característica importante de la plataforma de The Things Network es que la persona que implemente una solución de IoT no tendrá que preocuparse por la seguridad de su solución, ya que esta plataforma brinda seguridad de extremo a extremo, brinda un servidor para el almacenamiento de las claves necesarias en una red LoRaWAN, además genera claves de sesión para el servidor de red y el servidor de aplicaciones. De igual manera, esta plataforma brinda la facilidad para la conexión con el servidor de aplicaciones que la misma plataforma lo provee. Evita los costos de implementación de un servidor de aplicaciones y provee un abanico de integraciones que están listas para usarse sin mayores configuraciones. En la figura 7, se puede ver los componentes de la plataforma The Things Network, y su fácil integración con otros servicios (TTN, 2019b).

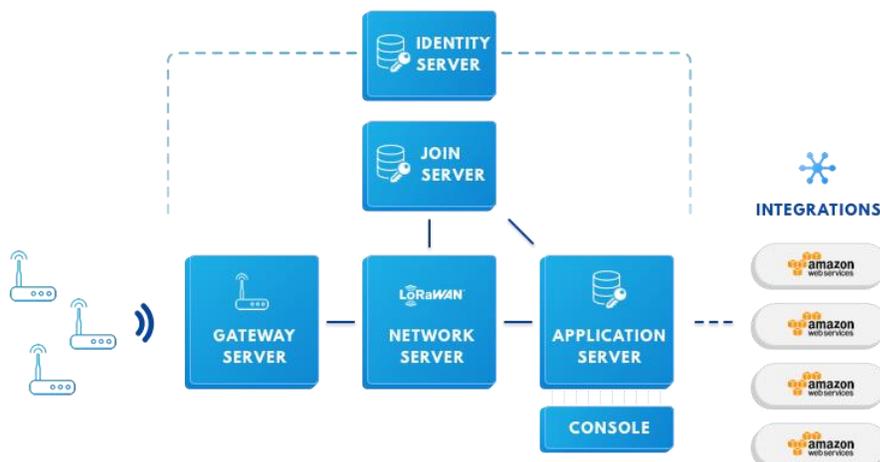


Figura 7. Stack de la plataforma The Things Network

Fuente: (TTN, 2019b).

Esta plataforma es una muy buena opción para realizar una prueba de concepto a una solución IoT, ya que evita los costos de implementación de los servidores de red y de aplicación, además; de ahorrar mucho tiempo en configuraciones, lo cual permite al desarrollador centrarse únicamente al mejoramiento de su propuesta.

2.4.1.1.1.4. Servidor de Aplicaciones.

El servidor de aplicaciones se encarga de preparar los datos recopilados por los dispositivos finales para que otras aplicaciones puedan emplearlos y darles el tratamiento que se necesite según la lógica de la solución. Sin embargo, hay servidores de aplicaciones que emplean técnicas de aprendizaje automático e inteligencia artificial para resolver problemas y presentar los resultados de manera directa al usuario (Semtech, 2019).

2.4.1.1.2. Clases de dispositivos.

LoRaWAN tiene 3 clases de dispositivos finales, los cuales nacen para cubrir diferentes necesidades en una amplia gama de aplicaciones.

2.4.1.1.2.1. Clase A.

Estos dispositivos son los de menor consumo. La comunicación siempre es iniciada por el dispositivo final y es completamente asíncrona. Cada transmisión ascendente puede enviarse en cualquier momento, y se apertura dos ventanas de enlace descendente con tiempo de retardo distinto, lo cual brinda un tipo de comunicación bidireccional o la posibilidad de enviar comando de control de red de ser necesario (LoRa-Alliance, 2015a).

2.4.1.1.2.2. Clase B.

Este tipo de dispositivos a más de emplear las ventanas de recepción iniciadas en los dispositivos de clase A, emplean la sincronización con la red mediante el empleo de balizas periódicas y abren ranuras de enlace descendente en horarios preestablecidos. Esto genera un mayor consumo de energía. En estos dispositivos la latencia es programable hasta 128 segundos con la finalidad que pueda adaptarse a diferentes aplicaciones (LoRa-Alliance, 2015a).

2.4.1.1.2.3. Clase C.

Estos dispositivos cuentan con la estructura de enlace ascendente de la clase A, junto con las dos ventanas de enlace descendente y reducen aún más la latencia de enlace descendente ya que mantienen al receptor del dispositivo final abierto en todo momento siempre y cuando el dispositivo no esté transmitiendo es decir “semidúplex”. Esto da lugar a que el servidor de red pueda iniciar una transmisión descendente en cualquier momento asumiendo que el dispositivo final está abierto para una transmisión. El consumo de energía por parte del receptor del dispositivo final puede ser de hasta 50 mW, por lo cual este tipo de dispositivos es recomendable para aplicaciones en donde exista energía eléctrica continua y no se dependa de baterías (LoRa-Alliance, 2015a).

2.4.1.1.3. Velocidad de Transmisión de Datos.

La velocidad de transmisión de datos en LoRaWAN puede variar entre 0.3 kbps a 50 kbps. Para maximizar la duración de la batería del dispositivo final y la capacidad de la red, el servidor de red es el encargado de gestionar la velocidad de transmisión para cada

dispositivo de manera individual aplicando un esquema de velocidad de datos adaptativa o ADR (LoRa-Alliance, 2015a).

2.4.1.1.4. Seguridad.

La seguridad dentro de esta red se adapta a los principios generales de una red LoRaWAN; bajo consumo de energía, implementación sencilla, bajo costo y una alta escalabilidad. La seguridad dentro de una red LoRaWAN se apega a los principios de vanguardia mediante el uso de algoritmos estándares y bien investigados, dotando una seguridad de extremo a extremo. Cada dispositivo se personaliza mediante una clave AES de 128 bits, la cual es conocida como clave de aplicación o AppKey y un identificador único llamado DevEUI de 64 bits el cual es asignado por el fabricante del chip LoRa (Gemalto & Semtech, 2017).

La seguridad es una necesidad primordial dentro de las soluciones IoT, ante esto; LoRaWAN define dos niveles de seguridad:

- Clave de sesión de Red (NwkSKey): Clave única AES de 128 bits que comparte el dispositivo final y el servidor de red. Esta clave sirve para autenticar el dispositivo final con la red (LoRa-Alliance, 2015a).
- Clave de sesión de Aplicación (AppSKey): Clave única AES de 128 bits compartida de extremo a extremo a nivel de aplicación. Esta clave garantiza que el operador o dueño de la red no tenga acceso a la información de usuario final (LoRa-Alliance, 2015a).

La autenticación en una arquitectura LoRaWAN puede darse de dos maneras:

- Activación Personalizada (ABP o Activation By Personalization): Este tipo de activación vincula directamente el dispositivo o nodo final a una red específica sin necesidad de una negociación o “join-request” para unirse a la red. Para realizar esta activación es necesario que la DevAddr y las dos claves de sesión; NwkSKey

y la AppSKey se almacenen de manera directa en el dispositivo final (LoRa-Alliance, 2015b).

- Activación por el Aire (OTAA o Over The Air Activation): Este tipo de activación requiere que los dispositivos finales sigan un procedimiento de negociación o “join-request” antes de participar en el intercambio de datos con el servidor de red. Este proceso debe realizarse cada vez que el dispositivo final pierda información del contexto de la sesión. Para poder realizar esta activación es necesario que los dispositivos finales cuenten con un identificador de dispositivo final o DevEUI (único a nivel mundial), identificador de aplicación (AppEUI) y una clave de aplicación AES-128 (AppKey), esta clave de aplicación la debe conocer el administrador o dueño de la red (LoRa-Alliance, 2015b).

2.4.1.2. Redes Sigfox.

Las redes Sigfox son una solución LPWAN de tipo propietario de la empresa francesa que lleva el mismo nombre, esta empresa se identifica como un operador de tecnología IoT. Esta red trabaja en la banda no licenciada o ISM. En Europa trabaja a 858 MHz, en América a 915 MHz y en Asia a 433 MHz. Sigfox gestiona esta red, la cual se basada en su propia tecnología.

El funcionamiento de esta red empieza en él envió de datos por parte de los dispositivos hacia el backend propietario de Sigfox, a partir de allí Sigfox se encarga totalmente de la gestión de la comunicación, lo cual hace que el proceso sea bastante sencillo para los desarrolladores, además para la interacción con el módulo de radio del dispositivo final se proporciona una única API que no requiere configuración alguna. Para empezar en Sigfox solo se necesita adquirir un módulo de radio compatible y estar suscrito a algún plan que la plataforma de Sigfox ofrece (Idiart, 2018). En la figura 8, se puede ver la arquitectura de una red Sigfox.

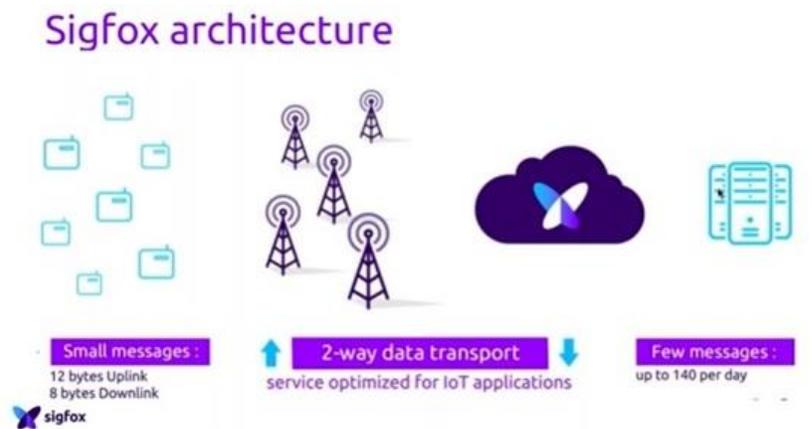


Figura 8. Arquitectura Sigfox

Fuente: (Idiart, 2018)

Al ser una tecnología propietaria que funciona sobre su propia red, esto puede generar ciertas limitantes en algunos países en los cuales aún no llega Sigfox, actualmente la red abarca 65 países. De igual manera existe una limitante a la hora del envío de mensajes, ya que solo se pueden enviar hasta 140 mensajes diarios, limitados a 7 mensajes cada hora, la longitud del mensaje no debe sobrepasar los 12 bytes. En lo que se refiere a recepción de mensajes por parte de los dispositivos finales, hay una limitación de 4 transmisiones por día (Idiart, 2018). En lo que se refiere a costos, tomando como referencia a Estados Unidos, ya que es un país de América que cuenta con cobertura Sigfox y se encuentran publicados los costos en el sitio web de Sigfox, una suscripción anual para el envío de un máximo de 140 mensajes por día puede llegar a costar \$33 dólares por dispositivo.

2.4.1.3. Redes NB-IoT.

Las redes Narrow Band Internet of Things o NB-IoT son una iniciativa de 3GPP o 3rd Generation Partnership Project. El objetivo de esta red es lograr estandarizar los dispositivos IoT para que puedan ser interoperables y fiables. NB-IoT es una tecnología inalámbrica de tipo móvil que emplea la modulación OFDM, por lo cual sus chips son complejos, pero de igual manera sus enlaces son mejores. Esto hace que la complejidad en esta tecnología aumente y además genere un mayor consumo de energía.

Estas redes son empleadas para enviar pequeñas cantidades de datos que son generados por dispositivos IoT. La velocidad de modulación es más rápida que las tecnologías Sigfox y LoRa. Esta tecnología es para dispositivos simples para que se conecten a una red de operadora a través de un espectro licenciado. La gran ventaja de esta tecnología es que no se requiere de gateways o equipos intermedios para lograr la comunicación. Ya que emplea las antenas de la telefonía celular. En la actualidad, algunos proveedores de telefonía como Vodafone ofrecen planes de NB-IoT.

2.4.1.4. Comparativa de tecnologías LPWAN.

Los datos para la presente comparativa fueron obtenidos de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (Tikhvinsky, 2018).

Tabla 2
Comparativa de redes LPWAN

Característica	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT
Método de modulación	CSS	-	OFDMA
Banda	ISM	ISM	Licenciada
Velocidad de transmisión	0.3 a 50 kbit/s	100 kbit/s	Subida: 1 a 144 kbit/s Bajada: 1 a 200 kbit/s
Ancho de banda	Amplia < 500 kHz	Estrecha 100 kHz	Estrecha 200 kHz
Seguridad	AES-64 y AES-128	AES y HMACs	-
Frecuencia	433/868/915 MHz	433/868/915 MHz	700/800/900 MHz
Dispositivos soportados por base	1500	790	-

Fuente: (Tikhvinsky, 2018).

Cada tecnología puede ser aprovechada según la necesidad de solución IoT que se quiera desarrollar. En este caso; las redes LoRaWAN se presentan como una mejor alternativa, en lo que se refiere a consumo de energía y además brinda la facilidad de poder implementarla sin necesidad de pagar alguna suscripción a una empresa de soluciones IoT o una operadora de telefonía. LoRaWAN también posee una gran comunidad incentiva para la cultura Maker para realizar proyectos que se adapten a la necesidad de cada desarrollador. LoRaWAN no tiene limitante geográfica ni depende de un tercero para su uso. Toda su documentación se encuentra en el sitio web de LoRa Alliance lo cual además de facilitar la implementación de una solución de este tipo, permite comprender a detalle el funcionamiento de esta tecnología.

2.5. Ciudades inteligentes.

Las ciudades inteligentes son ciudades que cuentan con infraestructura económica, social, institucional y física inteligentes, que aseguren principalmente la centralización de los ciudadanos en un ambiente sostenible. Se enfoca en el uso estratégico de las nuevas tecnologías y los acercamientos innovadores para lograr una mejora en la eficiencia y en la competitividad de las ciudades. La Unión Internacional de Telecomunicaciones manifiesta que una ciudad inteligente es aquella que emplea las tecnologías de la información y comunicación para mejorar la vida de sus habitantes, para obtener una eficiencia en las operaciones y en los servicios urbano y que a su vez cubra las necesidades de las generaciones presentes y las futuras en los aspectos económicos, ambientales y sociales (Habitat III, 2015).

Los sistemas de infraestructura en las ciudades se han convertido en sistemas de sistemas, ya que una red de sistemas mantiene operaciones o funciones que se relacionan. Estos sistemas cada vez permiten una mayor integración con las TICs, llegando hasta el Internet de las cosas con lo cual se logra una gestión integrada de operaciones. Aprovechar el máximo potencial de estas redes y tecnologías es una de las principales características de las ciudades inteligentes. Una ciudad inteligente cuenta con los siguientes atributos (Habitat III, 2015):

- **Sostenibilidad:** Todo lo concerniente a la infraestructura, gobernación, energía, cambio climático, contaminación, manejo de residuos, salud.

- Calidad de vida: Mejorar la calidad de vida en términos de bienestar financiero y emocional.
- Aspectos urbanos: Debe incluir tecnología e infraestructura moderna.
- Ingenio: Aspectos relacionados con movilidad inteligente, vida inteligente, ambiente inteligente e incluso economía inteligente.

2.5.1. Contenedores de basura inteligentes.

Un contenedor inteligente es aquel que está conectado a una red y se encuentra equipado con sensores que monitorean el volumen de basura, dando la posibilidad de detectar cuando un contenedor de basura ha llegado al máximo de su capacidad de almacenaje. Por lo general los datos llegan a las secretarías o empresas de limpieza, permitiendo que se realice una mejor planificación de las rutas de recolección, además de proporcionar información actualizada sobre la capacidad usada y disponible del contenedor. Esto permite una optimización del costo del servicio de la recolección de residuos y evita tener contenedores repletos de basura (Bouskela, Casseb, Bassi, Luca, & Facchina, 2016).

Los contenedores de basura inteligentes fueron creados con una finalidad integral acerca de los beneficios que puede tener una ciudad o espacio en el cual sean implementados. Lo ideal de estos contenedores inteligentes es que funcionen mediante energía solar ya que en los lugares en donde los suelen ubicar no cuentan con opción a conexión eléctrica. Esta solución busca contribuir con las empresas e instituciones a la generación de herramientas inteligentes que mejoren el bienestar de la sociedad y el medioambiente. Esta tecnología no solo busca el ahorro de costos, sino también busca mejorar la limpieza en los espacios públicos (Vigatec, 2018).

En la figura 9, se puede ver las fases que tiene una solución inteligente de gestión de residuos. Comienza con contenedores inteligentes que poseen sensores que envían datos en tiempo real o periódico dependiendo del tipo de tecnología que se emplee, también debe contar con un centro de monitoreo que pueda visualizar el estado de cada contenedor ubicado en distintos lugares geográficos, desde este centro de monitoreo se podrán gestionar rutas de recolección, que

conlleva menos camiones, combustible y tiempo que los métodos de gestión de residuos tradicionales. Esto da como resultado ciudades más limpias y reducción de emisiones nocivas (Vigatec, 2018).

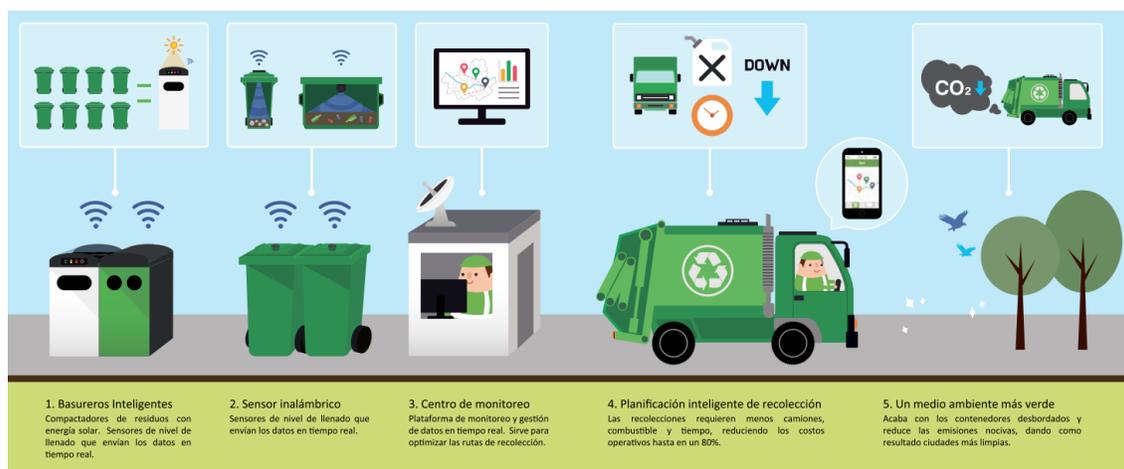


Figura 9. Solución inteligente de gestión de residuos

Fuente: (Vigatec, 2018).

2.5.2. Principales tipos de residuos.

Dentro de los principales tipos de residuos encontramos los siguientes:

- Domésticos o urbanos: Buena parte de estos residuos pueden llegar a ser biodegradables, este tipo de residuos se los conoce comúnmente como “basura” (Valtueña, 2002).
- Industriales: Estos residuos por lo general no son biodegradables, inclusive algunos pueden llegar a ser tóxicos e inalterables (Valtueña, 2002).
- Agrícolas: Estos residuos pueden generarse de la explotación agrícola, como por ejemplo el estiércol o los productos forestales no aprovechables como lo son las hojas secas (Valtueña, 2002).

2.5.3. Generación de residuos Urbanos.

Son algunos los factores que influyen en la generación de residuos, de los cuales se destacan los siguientes:

- Tamaño del núcleo urbano: Entre mayor sea el núcleo urbano, la generación de residuos será mayor (Vértice, 2007).
- Actividad económica: La generación de residuos dependerá muchas veces de la actividad económica que en cierto lugar se desarrolle (Vértice, 2007).
- Época de año: Esto se da porque los hábitos de consumo de los ciudadanos cambian dependiendo la época del año (Vértice, 2007).

Los residuos urbanos generalmente provienen de los siguientes materiales:

- Materia orgánica procedente de residuos de alimentos. Casi el 50% de la "basura urbana" que se genera en las ciudades está formada por restos de comida (Vértice, 2007).
- Vidrio: Empleado como envase para líquidos y en menor cantidad para alimentos. Desde el punto de vista ecológico, los envases de vidrio son reciclables en su totalidad (Vértice, 2007).
- Metales y latas: Empleados para almacenar alimentos en conserva, por lo general tienen un solo uso (Vértice, 2007).
- Plásticos: Empleados en su mayoría en envolturas o empaques de un solo uso. Estos plásticos generalmente provienen de derivados del petróleo, lo cual hace que tarden mucho tiempo en degradarse (Vértice, 2007).
- Papel y cartón: Empleados principalmente en herramientas de oficina (Vértice, 2007).

- TetraBrik: Empleados como envases de alimentos de un solo uso, por lo general están elaborados de cartón, aluminio y polietileno (Vértice, 2007).

2.6. Estado del arte

Para realizar el estado del arte sobre los contenedores de basura inteligentes usando LoRaWAN se empleó una revisión preliminar de literatura y se adoptó las fases para elaborar estados del arte de Olga Londoño, Luis Maldonado y Licy Calderón, las cuales se encuentran en su guía para construir estados del arte y se presenta en el siguiente esquema (Londoño, Luis, Maldonado, Licy, & Calderón Villafañez, 2014). En la figura 10, se puede visualizar un organizador gráfico con las fases del proceso de elaboración de estados del arte empleado en la presente investigación.



Figura 10. Proceso de diseño del estado del arte

2.6.1. Heurística

Se compone de la búsqueda y la compilación de las fuentes de información. En esta fase se analizan las fuentes encontradas y se seleccionan los puntos fundamentales con la finalidad de

organizar el material consultado y establecer las divergencias y convergencias de cada estudio encontrado (Londoño et al., 2014).

2.6.1.1. Preparación

En esta fase se identifica las áreas temáticas de la investigación comprendidas en el tema central.

- **Tema central:** Contenedores de basura inteligentes empleando la red LoRaWAN.
- **Áreas Temáticas:**
 - Redes de Datos.
 - Internet de las Cosas.

2.6.1.2. Exploración

Esta fase consiste en una lectura comprensiva y analítica del problema, se precisa la información que se requiere. Para la presente investigación se requiere información sobre contenedores de basura inteligentes, sin importar el método de conexión que se haya empleado. Además de encontrar las desventajas y ventajas de las soluciones existentes tanto comerciales como de investigación. De igual manera es importante conocer si alguna ciudad ya está empleando un sistema inteligente para la recolección de residuos.

2.6.1.3. Descriptiva

En esta fase se debe establecer los datos pertinentes y someterlos a una revisión. Para la presente investigación se analizarán estudios que se hayan publicado en el año 2015 en adelante. La base digital empleada es IEEE Explore. Además, debe contener entre sus palabras claves o en el título los siguientes términos:

- Garbage
- IoT
- SmartCity
- LoRaWAN
- Monitoring

2.6.1.4. Recolección

En esta fase se compila toda la información fruto de las fases anteriormente realizadas.

Tabla 3

Recolección de trabajos relacionados

Título	Autor	Cita
FastCollect: Offloading Generational Garbage Collection to integrated GPUs	Abhinav; Rupesh Nasre	(Abhinav & Nasre, 2016)
IoT based garbage management (Monitor and acknowledgment) system: A review	Sudharani Ashok Ghadage; Neeta Anilkumar Doshi	(Ghadage & Doshi, 2018)
A real-time smart dumpster monitoring and garbage collection system	Umar Draz; Tariq Ali; Jamshaid Ali Khan; Muhammad Majid; Sana Yasin	(Draz et al., 2018)
Smart Solutions for Smart Cities: Using Wireless Sensor Network for Smart Dumpster Management	Sahar Idwan; Junaid Ahmed Zubairi; Imran Mahmood	(Idwan, Zubairi, & Mahmood, 2016)
Design and implementation of remote monitoring system of solar lanterns, based on lorawan and cloud technology	Udaya Kumar Sahoo; Bijayananda Patnaik	(Sahoo & Patnaik, 2018)
Analysis of the use of LoRaWan technology in a	Marine Loriot; Ammar Aljer; Isam Shahrour	(Loriot, Aljer, & Shahrour, 2017)

CONTINÚA 

large-scale smart city demonstrator		
	Pallavi Nehete; Dhanshri	
Garbage Management using Internet of Things	Jangam; Nandini Barne; Prajakta Bhoite; Shalak Jadhav	(Nehete, Jangam, Barne, Bhoite, & Jadhav, 2018)
IoT based smart garbage monitoring & collection system using WeMos & Ultrasonic sensors	Saadia Kulsoom Memon; Faisal Karim Shaikh; Naeem Ahmed Mahoto; Abdul Aziz Memon	(Memon, Karim Shaikh, Mahoto, & Aziz Memon, 2019)
Iot Based Garbage Monitoring and Clearance Alert System	Himadri Nath Saha; Sourav Gon; Annesha Nayak; Samabrita kundu; Sumandrita Moitra	(Saha, Gon, Nayak, Kundu, & Moitra, 2019)
Arduino-based smart garbage monitoring system: Analysis requirement and implementation	Namakambo Muyunda; Muhammad Ibrahim	(Muyunda & Ibrahim, 2018)
Solutions for SmartCities: proposal of a monitoring system of air quality based on a LoRaWAN network with low-cost sensors	Agustin Candia; Soledad Natacha Represa; Daniela Giuliani; Miguel Ángel Luengo; Andrés Atilio Porta; Luis Armando Marrone	(Candia et al., 2018)

2.6.1.5. Selección

En esta fase se eligen los estudios que mayor semejanza tengan con el tema de investigación que se esté realizado. Aquí se eligen los estudios de la fase anterior.

Tabla 4*Selección de trabajos relacionados*

Código	Título	Autor	Cita
EP1	IoT based garbage management (Monitor and acknowledgment) system: A review	Sudharani Ashok Ghadage; Neeta Anilkumar Doshi	(Ghadage & Doshi, 2018)
EP2	A real-time smart dumpster monitoring and garbage collection system	Umar Draz; Tariq Ali; Jamshaid Ali Khan; Muhammad Majid; Sana Yasin	(Draz et al., 2018)
EP3	Smart Solutions for Smart Cities: Using Wireless Sensor Network for Smart Dumpster Management	Sahar Idwan; Junaid Ahmed Zubairi; Imran Mahmood	(Idwan, Zubairi, & Mahmood, 2016)
EP4	Garbage Management using Internet of Things	Pallavi Nehete; Dhanshri Jangam; Nandini Barne; Prajakta Bhoite; Shalak Jadhav	(Nehete et al., 2018)
EP5	IoT based smart garbage monitoring & collection system using WeMos & Ultrasonic sensors	Saadia Kulsoom Memon; Faisal Karim Shaikh; Naeem Ahmed Mahoto; Abdul Aziz Memon	(Memon et al., 2019)
EP6	Iot Based Garbage Monitoring and	Himadri Nath Saha; Sourav Gon; Annesha Nayak;	(Saha et al., 2019)

CONTINÚA 

	Clearance Alert System	Samabrita kundu; Sumandrita Moitra	
EP7	Arduino-based smart garbage monitoring system: Analysis requirement and implementation	Namakambo Muyunda; Muhammad Ibrahim	(Muyunda & Ibrahim, 2018)
EP8	Solutions for SmartCities: proposal of a monitoring system of air quality based on a LoRaWAN network with low-cost sensors	Agustin Candia; Soledad Natacha Represa; Daniela Giuliani; Miguel Ángel Luengo; Andrés Atilio Porta; Luis Armando Marrone	(Candia et al., 2018)

2.6.2. Hermenéutica

Consiste en realizar una lectura, análisis e interpretar los estudios seleccionados según el grado de interés y necesidad referente al tema de estudio de la presente investigación.

2.6.2.1. Interpretación

Se procede al análisis de los estudios seleccionados y distinguir las áreas temáticas.

EP1 (Ghadage & Doshi, 2018): IoT based garbage management (Monitor and acknowledgment) system: A review

En este artículo se aborda el problema que tiene la India con los desperdicios, ya que muchas veces se los encuentra regados al borde de la carretera, generando un mal olor y condiciones antihigiénicas para las personas que viven en los alrededores. Los autores proponen un sistema basado en sensores ultrasónicos e infrarrojos con la ayuda de un Arduino UNO y una Raspberry Pi2 para detectar el nivel de basura en un contenedor. El método de comunicación se da mediante un mensaje de texto por parte del Raspberry al

conductor del camión recolector. Por lo cual se puede determinar que emplea GSM para las comunicaciones.

EP2 (Draz et al., 2018): A real-time smart dumpster monitoring and garbage collection system

Este artículo aborda las problemáticas del desbordamiento de los contenedores de basura por el exceso de basura que pueden llegar a soportar. A esto se le suma la falta de monitoreo por parte de la autoridad competente, lo cual genera un ambiente insalubre y condiciones desagradables para los habitantes. La propuesta para resolver el problema mencionado es un dispositivo IoT que incluya un GPS y cuando el contenedor de basura se encuentre lleno enviará un mensaje de texto con la ubicación del contenedor y que la autoridad competente pueda tomar las medidas respectivas con aquel contenedor de basura lleno. El método de comunicación de esta solución es GSM.

EP3 (Idwan, Zubairi, & Mahmood, 2016): Smart Solutions for Smart Cities: Using Wireless Sensor Network for Smart Dumpster Management

Este artículo relata las ventajas de las ciudades inteligentes para la gestión de servicios. Propone el empleo de sensores inalámbricos destacando su versatilidad, bajo costo y capacidad de comunicación. Se propone tres niveles para de lectura del nivel de basura de un contenedor de basura; alto, medio y bajo. Esta medición permite a la autoridad competente tomar acciones sobre los camiones de recolección de basura y poder planificar los viajes de mejor manera, minimizando el consumo de combustible de los camiones. En el artículo no se especifica el tipo de comunicación que se empleó.

EP4 (Nehete et al., 2018): Garbage Management using Internet of Things

En este artículo relata las ventajas de IoT para ayudar a tener una ciudad limpia y ordenada, tratando de disminuir la desdicha y los malestares causados por los contenedores de basura. Por lo cual se busca monitorear estos contenedores para evitar posibles enfermedades. Se propone un contenedor de basura inteligente que busca controlar la acumulación de basura para contribuir a la formación de una ciudad inteligente. El método de comunicación empleado en este artículo es GSM.

EP5 (Memon et al., 2019): IoT based smart garbage monitoring & collection system using WeMos & Ultrasonic sensors

Este artículo propone una solución para frenar el enorme aumento de la basura que no solo pone en riesgo a la raza humana sino también el medio ambiente. Además, que en las ciudades inteligentes cada vez es más común sistemas inteligentes que contribuyan de manera eficaz a la resolución de problemas y frenar el impacto ambiental que generan las actividades que realiza el ser humano. La solución se basa en sensores ultrasónicos y WeMos lo cual permite que se pueda ver los resultados en tiempo real de la cantidad de basura que tiene un contenedor en ese preciso momento. El método de comunicación empleado en esta investigación es WiFi.

EP6 (Saha et al., 2019): Iot Based Garbage Monitoring and Clearance Alert System

En este artículo se relata el problema del desbordamiento de los contenedores de basura, los cuales podrían desencadenar en enfermedades para las personas. La solución propuesta es un sistema de alerta de recolección y monitoreo de la basura. Se monitorea el nivel de basura que posea un contenedor y al estar al máximo de su nivel enviará una alerta al municipio correspondiente. El sistema estará conectado mediante WiFi y las alertas se enviarán mediante una aplicación de Android.

EP7 (Muyunda & Ibrahim, 2018): Arduino-based smart garbage monitoring system: Analysis requirement and implementation

En este artículo se propone una solución para que las autoridades puedan monitorear la basura en los contenedores. De tal manera que se pueda gestionar de mejor manera los recursos para la recolección de la basura. Evitando que la basura se acumule en ciertas áreas y genere enfermedades para los habitantes, además de entornos desagradables. En esta investigación se emplea como módulo principal un Arduino, y el método de comunicación es mediante WiFi.

EP8 (Candia et al., 2018): Solutions for SmartCities: proposal of a monitoring system of air quality based on a LoRaWAN network with low-cost sensors

En esta investigación no se habla sobre el problema del desbordamiento de los contenedores de basura. Pero menciona las ventajas de una red LoRaWAN para medir la calidad del aire. Para ello se empleó hardware y software gratuito. La información se transmite a una plataforma escalable para IoT en la nube. Los resultados obtenidos en la investigación aportan para la construcción de futuras ciudades inteligentes.

2.6.2.2. Publicación

Después de realizar el estado del arte se puede evidenciar que ya existen soluciones para el problema de la acumulación de basura, sin embargo; todas estas soluciones emplean una conectividad GSM o WiFi, y en ningún estudio se prioriza el bajo consumo y una aplicabilidad más real, con mayor alcance y con varios nodos conectados al mismo tiempo. De igual manera todos estudios se realizan en ambientes controlados ya que proveen una conexión WiFi, pero se conoce que sería muy complejo proveer una conexión WiFi para miles de contenedores de basura que puede haber en una ciudad, por lo cual la solución no es muy aplicable a las condiciones actuales y demanda de la sociedad. En el caso de emplear la tecnología GSM se emplea mensajes de texto y la comunicación no es muy transparente y hace más complejo la gestión de los nodos que se instalarían en los contenedores de basura.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Metodología Design Science

Esta metodología tiene como principio fundamental que el conocimiento, comprensión de un problema y su posible solución, se la logra mediante la aplicación y la construcción de un artefacto (Hevner et al., 2004). Esta metodología es ideal para la presente investigación ya que se requiere la implementación de un gateway y de los nodos finales para la red LoRaWAN y la mejor manera de aprender es construyendo y poniendo a prueba lo realizado.

3.1.1. Pautas de la metodología.

3.1.1.1. Diseño del artefacto.

El resultado de la metodología Design Science es por definición un artefacto de TI con el propósito que pueda cubrir un problema o parte de este. Este artefacto debe describirse de manera efectiva permitiendo su implementación y aplicación. Al referirse a un artefacto de TI, no solo hace referencia a componentes de software o hardware, sino también a construcciones y modelos aplicados al desarrollo y uso de las tecnologías de la información (Hevner et al., 2004).

3.1.1.2. Relevancia del problema.

El objetivo de una investigación es adquirir conocimiento y comprensión con la finalidad que se pueda desarrollar e implementar soluciones tecnológicas para problemas que hasta ahora no cuentan con una solución o esta no es la óptima. Design Science se acerca a este objetivo a través de la construcción o elaboración de artefactos innovadores que buscan solucionar el problema abordado. Es necesario demostrar que tales artefactos basados en la tecnología son necesarios para abordar el problema deseado (Hevner et al., 2004).

3.1.1.3. Evaluación del diseño.

Los artefactos diseñados deben tener una utilidad, calidad y eficacia que debe demostrarse mediante rigurosos métodos de evaluación bien ejecutados. Esta evaluación es un componente muy importante dentro del proceso de la investigación. Se debe establecer los requisitos en los cuales se basa la evaluación del artefacto y se debe tener una definición clara de las métricas apropiadas y la manera de recopilar y analizar los datos a evaluar. Los artefactos se pueden evaluar en los siguientes términos (Hevner et al., 2004):

- Usabilidad.
- Desempeño.
- Precisión.
- Funcionalidad.
- Integridad.
- Consistencia.
- Confiabilidad.
- Otros atributos de calidad relevantes.

3.1.1.4. Contribuciones de investigación.

La investigación debe proporcionar contribuciones claras en las áreas de conocimiento del artefacto diseñado. Es decir, debe proporcionar un conocimiento claro en la construcción del diseño y en la evaluación de este. Design Science tiene el potencial de brindar tres tipos de contribuciones de investigación, estas son; novedad, generalidad y significado del artefacto de TI diseñado. Una investigación efectiva debe contar con una o más de las contribuciones antes mencionadas (Hevner et al., 2004).

3.1.1.5. Rigor de la investigación.

El rigor de la investigación es la forma en la que se lleva a cabo la investigación. Una investigación empleando Design Science requiere de la aplicación de métodos rigurosos para la construcción del artefacto como para la evaluación de este. Por lo general se evalúa el cumplimiento de técnicas apropiadas para la recolección y análisis de datos. Esta metodología por lo general se basa en el formalismo matemático para describir el artefacto

diseñado, sin embargo en artefactos de TI se puede desafiar el formalismo excesivo, ya que en este caso, el rigor debe aplicarse en la evaluación de la aplicabilidad y generalización del artefacto (Hevner et al., 2004).

3.1.1.6. Diseño como proceso de búsqueda.

El diseño es un proceso iterativo, que busca el mejor diseño o el óptimo. Se busca tener diseños factibles y que puedan implementarse en diferentes entornos sin variar su funcionamiento. El diseño es esencial para el proceso de búsqueda de una solución efectiva a un determinado problema. La resolución de este problema puede verse como el empleo de los materiales necesarios para cumplir con el fin deseado y al mismo tiempo satisfacer las normativas ambientales. El diseño requiere de conocimiento tanto en el dominio de la aplicación (requisitos, restricciones y limitantes) como en el dominio de la solución (técnico, operativo y organizativo) (Hevner et al., 2004).

3.1.1.7. Comunicación de la investigación.

Los resultados obtenidos deben presentarse al público relacionado y orientado a la tecnología como también al público relacionado con la gestión. Por lo general el público orientado a la tecnología necesitan de detalles mucho más técnicos y suficientes como para permitir que el artefacto diseñado se pueda implementar y se pueda emplear en diferentes contextos. Esto permite a los investigadores construir una base de conocimiento acumulativa que permitirá una mayor extensión y evaluación (Hevner et al., 2004).

3.1.2. Aplicación de la metodología.

Design Science puede ser aplicado de diversas formas, siempre y cuando se aplique sus siete pautas antes mencionadas. La figura 11 muestra los pasos seguidos de la metodología Design Science para la presente investigación.

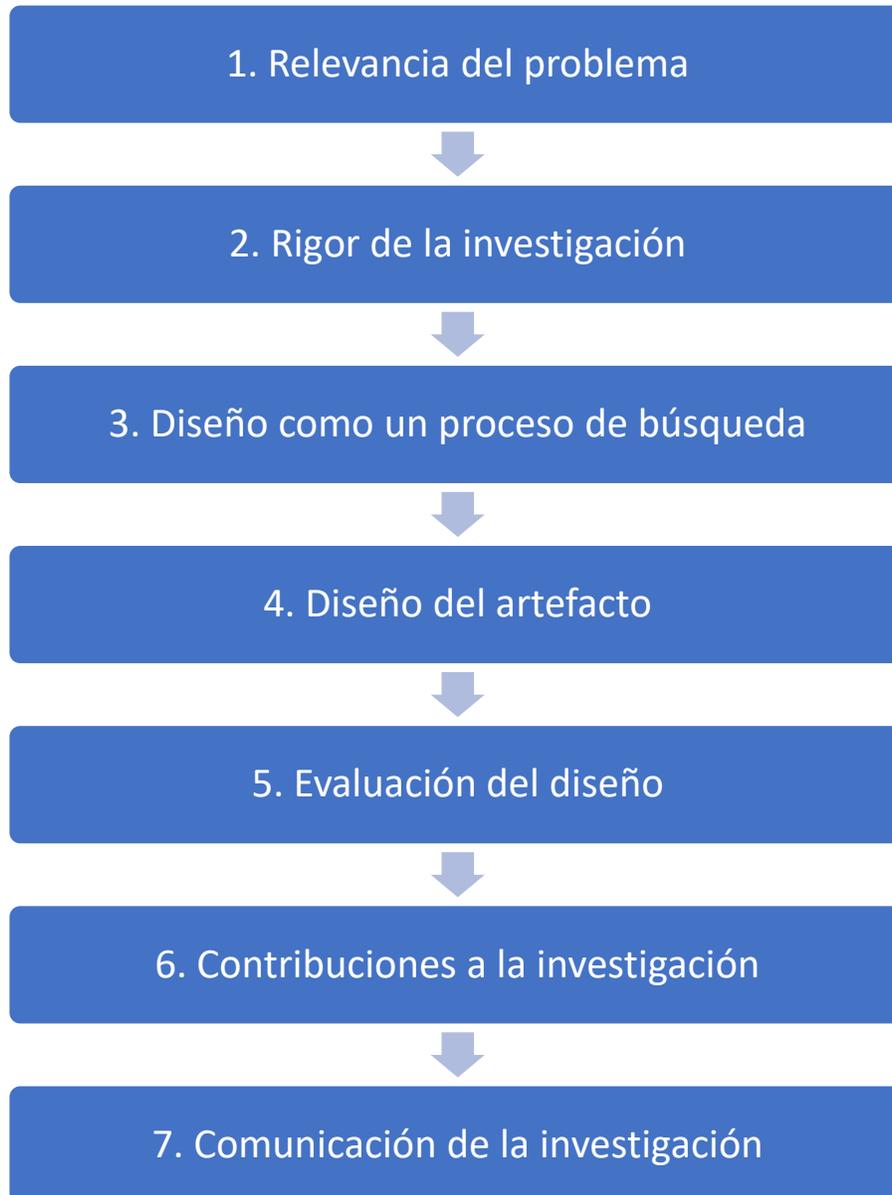


Figura 11. Pasos de la Metodología Design Science

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DE LA PROPUESTA

4.1. Diseño de la arquitectura

Para el diseño de la arquitectura se tomó en cuenta una alternativa que reduzca los costos de implementación y uso, razón por la cual dentro de la arquitectura están contemplados componentes que son ofrecidos por terceros de manera gratuita bajo un uso moderado.

Esta arquitectura contiene los siguientes componentes:

- Nodos finales o recolectores de información.
- Gateway LoRaWAN.
- Servidor de red.
- Servidor de Aplicaciones.
- Cliente.

En la figura 12, se puede visualizar todos los componentes que forman parte de la arquitectura de la presente investigación.

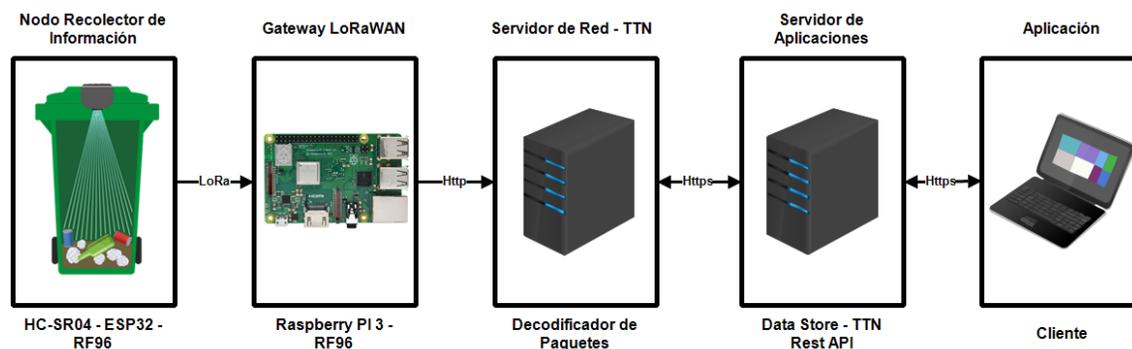


Figura 12. Arquitectura la solución de contenedores inteligentes usando LoRaWAN

4.1.1. Nodo recolector de información.

Este componente se encarga de la lectura de manera periódica del nivel de residuos que posee un contenedor de basura. Su principal función es enviar los datos de la medición hacia el

gateway. Para la medición del nivel de residuos se emplea el sensor ultrasónico HC-SR04, el cual permite determinar la distancia existente entre el sensor y algún objeto (Rush, 2016). Este sensor se conecta a ESP32-DevKitC, la cual es una placa de desarrollo de fácil configuración y tamaño reducido (Espressif, 2019). De igual manera se encuentra conectado el módulo RF95 a la tarjeta ESP32-DevKitC, este módulo permite que el nodo pueda comunicarse usando LoRa RF, lo cual proporciona una comunicación de espectro extendido, alta inmunidad a las interferencias y bajo consumo de corriente (HOPERF, 2019).

4.1.2. Gateway LoRaWAN

Este componente se encarga de recibir los datos transmitidos desde el nodo recolector de información y reenviarlos hacia el servidor de red (TTN, 2019a). Para obtener un gateway de bajo costo y cumpla con los requerimientos de la presente investigación se emplearon los siguientes componentes:

4.1.2.1. Raspberry Pi 3 B+

Es una computadora de placa única de tercera generación, posee un procesador de cuatros núcleos de 1,4 GHz de 64 bits. En lo que se refiere a conectividad está equipada con LAN inalámbrica IEEE 802.11b/g/n de 2.4GHz y 5GHz, puerto Gigabit Ethernet sobre USB 2.0 y Bluetooth 4.2. Tiene 40 pines GPIO (General Purpose Input/Output, Entrada/Salida de Propósito General). Es compatible con Linux y Windows 10 IoT (Raspberry, 2019). En la figura 13, se puede visualizar el Raspberry empleado en la presente investigación.



Figura 13. Raspberry Pi 3B+

Fuente: (Raspberry, 2019)

Raspbian es el sistema operativo que se ha seleccionado para la presente investigación, ya que es un sistema operativo gratuito basado en Debian y optimizado especialmente para el hardware de Raspberry Pi. Además trae consigo más de 35000 paquetes para poder hacer uso de ellos de manera rápida (Raspbian, 2019). Raspbian ofrece paquetes de desarrollo preinstalados que hacen que el desarrollo sea más rápido, por ejemplo; trae consigo instalado el compilador para lenguaje C, que para la presente investigación es ideal ya que el repositorio que se emplea para instalar las funcionalidades de gateway están escritas en lenguaje C.

El software que se instaló en el Raspberry Pi fue descargado de un repositorio gratuito de GitHub. Su autor “Charles Hallard” desarrollo una implementación de una prueba de concepto para un gateway LoRaWAN de un solo canal (Hallard, 2018). Para esta implementación se necesita contar con un Raspberry Pi y un módulo RF95.

4.1.2.2. Placa LoRa/LoRaWAN para Raspberry Pi

Es una placa que cuenta con los componentes para poder funcionar como un nodo LoRa o como un gateway de un solo canal. Es compatible con cualquier sistema IoT, especialmente con soluciones que incluyan el uso de la plataforma The Things Network. Esta placa cuenta con los siguientes componentes:

- Chip RF95.
- Conector de 20x2 pines.
- Pantalla Oled.
- Conector SMA

El chip RF95 es el que permite la comunicación LoRa, el conector de 20x2 pines permite la conexión con el Raspberry Pi y en el conector SMA se conectará la antena. Esta placa es “open hardware”, por lo cual sus diagramas esquemáticos son de acceso público y no hay que pagar ningún valor por ellos, de igual manera aplica para uso siempre y cuando se reconozca a su autor. Esta placa fue creada y ensamblada por Philippe Cadic.

El funcionamiento de este componente empieza con la recepción de los paquetes enviados por el nodo recolector de información, en este paso se emplea únicamente comunicación LoRa.

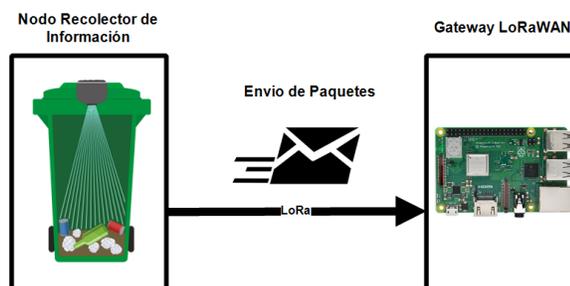


Figura 14. Comunicación entre el nodo con el gateway.

Una vez que el paquete se encuentre en gateway, este procede a enviarlo al servidor de red. En este paso convierte el paquete enviado en LoRa, al formato HTTP.

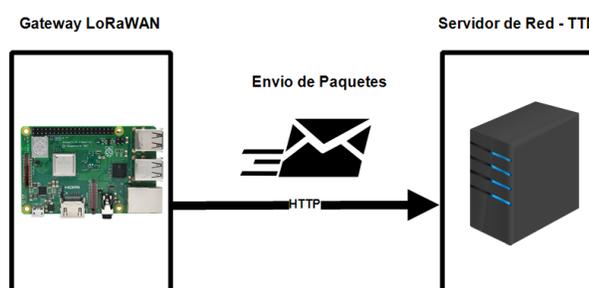


Figura 15. Comunicación entre el gateway con el servidor de red

4.1.3. Servidor de Red

El servidor de red se encarga de decodificar y filtrar los paquetes que provienen desde el nodo recolector de información y que han pasado por el gateway. En la presente investigación se emplea el servicio provisto por la plataforma The Things Network. Este servicio es totalmente gratuito y cuenta con todas las funciones para gestionar gateways, dispositivos y aplicaciones. TTN utiliza “Joins Servers” los cuales almacenan las claves LoRaWAN de manera segura y proveen claves de sesión para el servidor de red.

Una ventaja por la cual se emplea TTN en la presente investigación, es que la plataforma TTN ofrece una integración con otras aplicaciones empleando protocolos estándares de la

industria. TTN trabaja con el diseño “API-first”, el cual permite desarrollar primero la API y que su contexto sea mucho más amplio para cubrir con las necesidades o requerimientos de una determinada solución.

El funcionamiento de este componente de la arquitectura empieza con la recepción de los paquetes que son retransmitidos por el gateway; estos paquetes se originan en el nodo recolector de información. Una vez que el paquete ha llegado al servidor de red, se procede con la decodificación de este, haciendo que el mensaje sea legible para el ser humano. Como último paso, el servidor de red envía el paquete decodificado al servidor de aplicaciones.

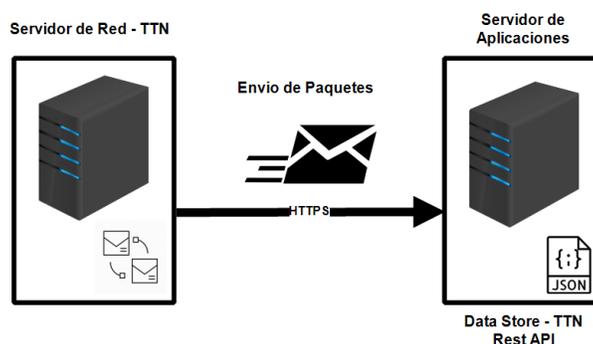


Figura 16. Comunicación entre el servidor de red con el servidor de aplicaciones.

4.1.4. Servidor de Aplicaciones

El servidor de aplicaciones es el punto final para que los clientes puedan usar los datos transmitidos desde el nodo recolector de información. Este componente brinda al usuario una API REST para que este pueda obtener la información empleando los métodos HTTP. Para la presente investigación se emplea el servicio Data Store de TTN, este servicio es ofrecido como una integración para el servidor de red. Data Store se integra de manera rápida y sencilla al servidor de red y ofrece el almacenamiento de los datos que se generan desde los nodos recolectores de información. Este servicio pone a disposición los datos mediante una API; esta cuenta con una clave de acceso para cada consulta que se realice, esta clave de acceso debe venir en la cabecera Authorization del método HTTP.

El funcionamiento de este componente empieza desde la recepción de los datos que fueron decodificados por parte del servidor de red. A continuación, el servidor de aplicaciones

almacena en su base de datos. Como parte final, provee de una REST API segura, para que el cliente pueda emplear los datos transmitidos desde los nodos recolectores de información.

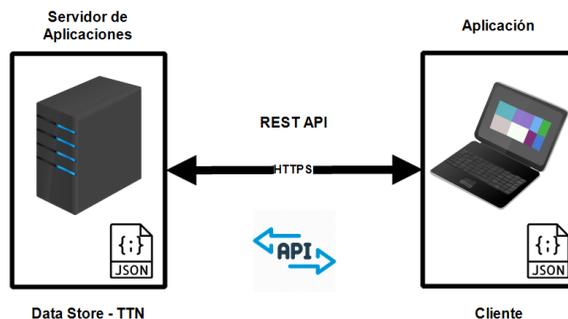


Figura 17. Comunicación entre el servidor de aplicaciones con el cliente.

4.2. Diseño de los componentes.

4.2.1. Nodo recolector de información.

Para el diseño de este componente se empleó la tarjeta de desarrollo ESP32-DevKitC que cuenta con 30 pines, de los cuales; 25 pines son para GPIO (General Propuse Input/Output), a esta tarjeta se encuentran conectados el módulo LoRa RF95, un multiplexor 74LS151 que conecta los 3 sensores ultrasónico HC-SR04 y el módulo GPS Ublox Neo-6m-0-001. Adicional a eso; para minimizar el consumo de energía se usó un transistor MOSFET; el cual cumple la función de conmutador, interrumpiendo el paso de la corriente. Esto se lo realiza con la finalidad que únicamente se energicen los componentes el momento que se realice la transmisión, mientras tanto permanezcan apagados sin consumir energía. En el anexo 1, se encuentra el diseño del circuito empleado para el nodo recolector de información, de igual manera en el anexo 2 se encuentra el código empleado para el funcionamiento del nodo recolector de información.

Los sensores ultrasónicos se encargan de medir la distancia al objeto más próximo dentro del contenedor, cada sensor tiene 4 pines, tal como se puede ver en la figura 18, uno de ellos corresponde a Vcc y otro a Gnd, los 2 pines restantes son para la comunicación con la tarjeta ESP32.



Figura 18. Sensor ultrasónico HC-SR04

Dado que cada sensor ultrasónico necesita conectarse mediante dos pines a la tarjeta ESP32, eso implica que para los 3 sensores que se emplearán en el nodo recolector de información se utilicen 8 de los 25 pines de la tarjeta ESP32, razón por la cual se ha colocado un multiplexor de 8 a 1 para reducir la cantidad de pines empleados de 6 a 3. En la figura 19, se puede ver los pines del multiplexor 74LS151. De las 8 entradas que posee este multiplexor solo se usan 3, una por cada sensor. El pin 7 se conecta a tierra para que el multiplexor funcione.

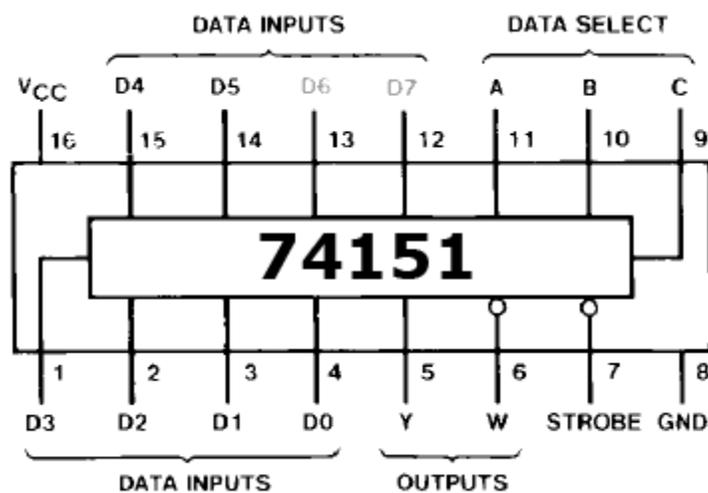


Figura 19. Multiplexor 74LS151

Fuente: (Texas Instruments, 1998)

Como se muestra en la tabla 5, para la tabla de verdad solo se emplean 2 bits, ya que únicamente se necesitan 4 posibles combinaciones y el tercer bit del selector se lo conecta a Vcc, ya que por cuestiones de diseño se empleó las entradas D4, D5 y D6.

Tabla 5

Tabla de verdad del multiplexor

Pin	Pin	Sensor
LOW	LOW	1
LOW	HIGH	2
HIGH	LOW	3

En la figura 20, se puede observar el módulo GPS empleado, este módulo cuenta con 4 pines, los pines de datos tanto TX como RX van conectados a los pines TX y RX de la tarjeta ESP32 de manera cruzada. Para evitar el consumo innecesario y dado que la funcionalidad del nodo recolector de información es enviar información de manera periódica, los sensores ultrasónicos y el módulo GPS entrar en funcionamiento únicamente cuando el módulo esté listo para transmitir caso contrario permanecerán inactivos.

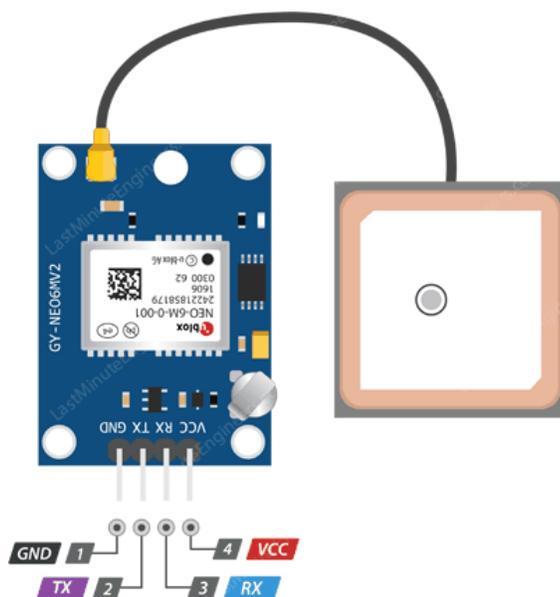


Figura 20. Módulo GPS Neo 6m

Fuente: (U-Blox, 2011)

4.2.2. Gateway LoRaWAN.

Para el diseño de este componente se empleó el módulo LoRa RFM95, el cual se conecta a una Raspberry Pi 3 B+, el esquema de este circuito se encuentra en el anexo 3. En la figura 21, se puede ver cada uno de los pines del módulo LoRa RFM95.

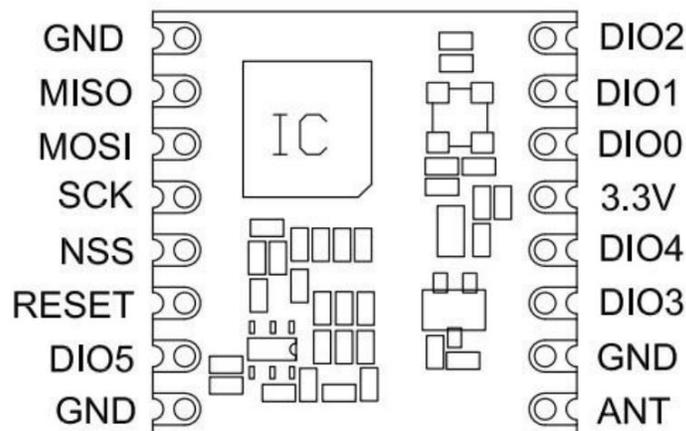


Figura 21. Módulo LoRa RFM95

Fuente: (HOPERF, 2019)

De los pines que se encuentran en la figura 21, los que se emplean para el gateway son los siguientes:

- ANT: Conector para la antena.
- MISO: Permite la transmisión de datos a otro dispositivo.
- MOSI: Permite la recepción de datos desde otro dispositivo.
- DIO1: Entrada y salida digital.
- DIO5: Entrada y salida digital.
- NSS: Entrada para la selección del chip.
- SCK: Entrada de señal de reloj.
- RESET: Cumple la función de resetear el módulo.
- 3.3V: Conexión a la fuente de poder.
- GND: Conexión a tierra.

Dado que el módulo LoRa se encuentra adaptado a una tarjeta de desarrollo y esta incluye un socket de 20x2, el cual permite conectar con todos los pines GPIO de la Raspberry Pi, pese a que no se ocupen todos, en caso de requerir un GPIO para cualquier uso, se debe verificar que GPIO no se use para la conexión con el módulo LoRa en el esquema que se encuentra en el anexo 3.

Una vez realizada la conexión entre el módulo LoRa RFM95 y la Raspberry Pi se realizó las siguientes configuraciones en software dentro del Raspberry PI:

- Instalación la librería BCM2835-1.50.
- Instalación e implementación de la librería arduino-lmic que se encuentra en el repositorio de Hallard.
- Instalación e implementación de la librería single_chan_pkt_fwd que se encuentra en el repositorio de Hallard.
- Colocar en las configuraciones de la librería la dirección del servidor de red y el puerto a emplearse, en este caso la dirección de servidor de red es: router.us.thethings.network y el puerto: 1700

Todas las configuraciones antes mencionadas se realizaron asumiendo que la conexión a internet se da mediante el puerto ethernet o eth0 de la Raspberry PI, en caso de que se desee usar la conexión inalámbrica de la Raspberry Pi, se debe modificar la librería single_chan_pkt_fwd.

4.2.3. Servidor de Red.

Para la presente investigación se empleó el servidor de red que proporciona The Things of Network (TTN), esto ayuda a reducir los costos en infraestructura, instalación y configuración del servidor. El gateway diseñado se conecta al router “ttn-router-us-west” que se encuentra en la parte Oeste de los Estados Unidos, con una frecuencia de funcionamiento de 915 MHz.

Para lograr conectar el gateway primero se debe crear una cuenta dentro de la plataforma de The Things Network (TTN), esta cuenta no tiene ningún costo. Luego de eso, dentro de la consola se debe registrar un nuevo gateway. Para registrar un gateway se debe contar con los siguientes datos:

- Gateway ID: Este ID es proporcionado por el usuario que desea registrar el gateway, este identificador es único.
- Descripción: Breve descripción del gateway.
- Frecuencia: La frecuencia en la cual trabajará el gateway.
- Router: El enrutador al cual el gateway se conectará.
- Ubicación: La posición geográfica en la cual se encuentra el gateway.
- Antena: Colocación de la antena del gateway, puede ser interior o exterior.

En anexo 4, se puede evidenciar el formulario que se debe llenar para colocar un gateway en la red TTN.

Hasta el momento solo se ha registrado el gateway dentro del servidor de red, no obstante, es necesario que también se registre el nodo recolector de información. Para registrar el nodo, se debe registrar una nueva aplicación, y dentro de esta se debe registrar un nuevo dispositivo. Para registrar un dispositivo dentro de la plataforma de The Things Network (TTN) se necesitan los siguientes datos:

- Device ID: Identificador único para el dispositivo, el usuario puede ponerle el que desee siempre y cuando esté disponible.

- Device EUI: Identificador único para el dispositivo en la red, este identificador puede ser editado más adelante. También hay la posibilidad que se genera automáticamente.
- App Key: Es la clave de aplicación que se empleará para proteger la comunicación entre los dispositivos y la red, esta clave puede ser generada automáticamente.
- App EUI: Identificador para la aplicación final.

En la figura 22 se puede evidenciar el formulario que se debe llenar para colocar un dispositivo final en la red TTN.

The image shows a web form titled "REGISTER DEVICE" with a link "bulk import devices" in the top right corner. The form contains the following fields:

- Device ID**: A text input field. Below it, a note states: "This is the unique identifier for the device in this app. The device ID will be immutable."
- Device EUI**: A text input field with a pencil icon on the left and the text "this field will be generated" on the right. Below it, a note states: "The device EUI is the unique identifier for this device on the network. You can change the EUI later."
- App Key**: A text input field with a pencil icon on the left and the text "this field will be generated" on the right. Below it, a note states: "The App Key will be used to secure the communication between you device and the network."
- App EUI**: A text input field containing the hexadecimal value "78 B3 D5 7E D0 02 59 22" and a dropdown arrow on the right.

Figura 22. Formulario de registro de dispositivos en TTN

De esta manera ya se tiene registrado el gateway y el nodo recolector de información en el servidor de red. Para el nodo recolector de información se empleó el método de activación personalizado o ABP, debido a que el nodo únicamente cuenta con la posibilidad de enviar paquetes hacia el gateway y no cuenta con la característica de recibir paquetes enviados por el gateway, razón por la cual, si se emplea el método de activación OTAA o activación por aire, no sería viable ya que este método de activación requiere que el gateway envíe paquetes al nodo para lograr la autenticación.

Dentro del código del nodo recolector de información debe estar presente los siguientes datos:

- Device Address: Dirección del dispositivo (4 bytes), esta dirección es generada por TTN.
- Network Session Key: Clave de sesión de red (16 bytes), esta clave es generada por TTN.
- App Session Key: Clave de sesión de aplicación (16 bytes), esta clave es generada por TTN.

Con toda la información antes mencionada ya se tiene conexión entre el nodo recolector de información y el gateway. Esta conexión puede ser observada dentro de la plataforma The Things Network (TTN), sin embargo, aún se debe configurar el servidor de aplicaciones.

4.2.4. Servidor de Aplicaciones.

Al igual que el servidor de red, el servidor de aplicaciones es provisto por la plataforma The Things Network (TTN). Este servidor se integra de manera directa con el servidor de red y proporciona seguridad mediante un token para la realización de peticiones de la información recogida por el nodo final. Para la presente investigación se empleó el DataStore versión 2.0.1. Esta integración permite conservar los datos de manera persistente en una base de datos durante siete días, para recuperar estos datos se debe utilizar la API.

La API que brinda DataStore de TTN, está disponible a través de HTTPS y los datos son entregados en formato JSON. Para acceder a estos datos se debe proporcionar la cabecera “Authorization” de HTTP con el valor “key” acompañado de la clave de acceso que se encuentra en la sección de aplicaciones del dispositivo. En la figura 23 se puede ver la integración funcionando correctamente.

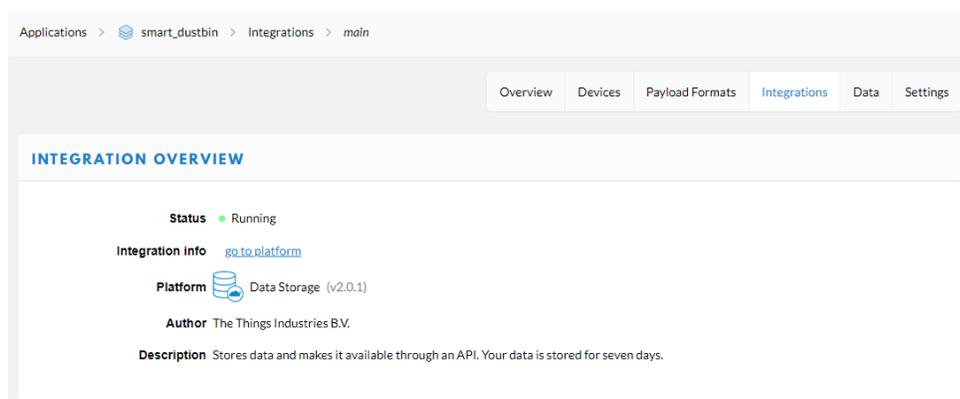


Figura 23. Integración con DataStore

Para ver el funcionamiento de esta integración y del servidor de aplicaciones en general, se lo puede realizar mediante swagger; que es un conjunto de herramientas y especificaciones que contribuyen a la documentación de las APIs. En la figura 24, se puede ver la documentación de la API para la presente investigación.

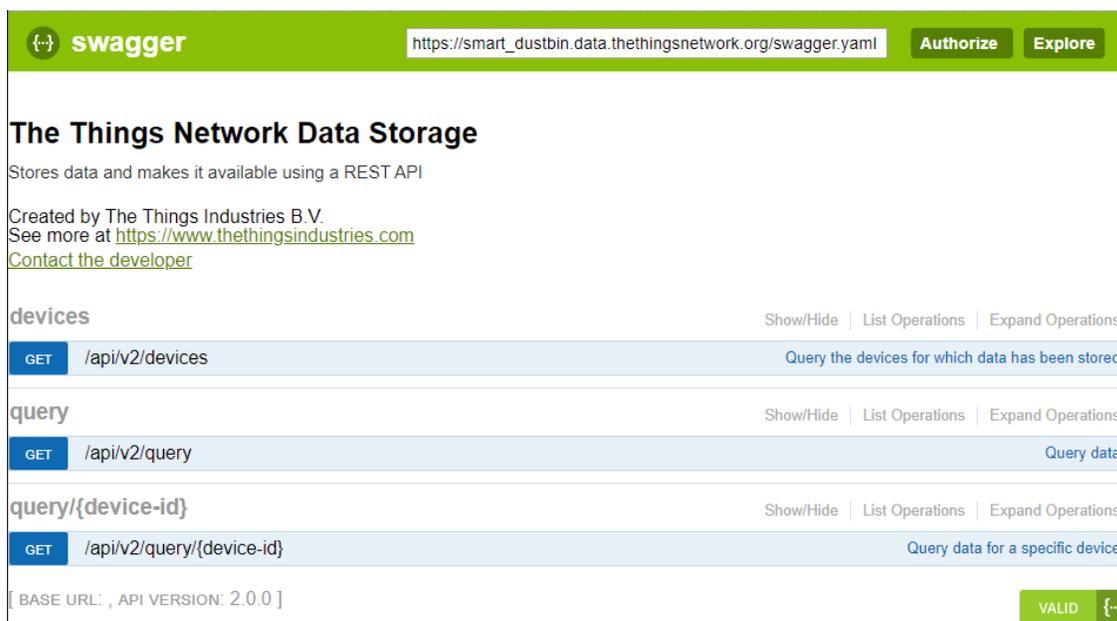


Figura 24. Documentación de la API del servidor de aplicaciones

4.2.5. Cliente.

El cliente consume los datos provisto por el servidor de aplicaciones. Para la presente investigación se ha desarrollado una plataforma web que permite visualizar en tiempo real, la

ubicación del contenedor y su nivel de almacenaje disponible. Esta plataforma está desarrollada en el entorno de desarrollo NodeJS, y para el almacenamiento de los datos de los usuarios se empleó la base de datos NoSQL MongoDB.

Para la visualización en tiempo real tanto de la posición como de los datos de cada contenedor se emplea una biblioteca de JavaScript de código abierto llamada “Open Layers”, esta biblioteca permite mostrar mapas interactivos en los navegadores web. Sobre la biblioteca de Open Layers trabaja la biblioteca de código abierto “Leaflet”, la cual permite crear mapas interactivos con un diseño simplificado, basado en rendimiento y usabilidad.

Mediante Leaflet se realiza la consulta a la API del servidor de aplicaciones. Leaflet necesita de respuesta un objeto de tipo GeoJSON, este objeto tiene la siguiente estructura:

```
{
  "type": "Feature",
  "geometry": {
    "type": "Point",
    "coordinates": [74.089876, 0.258756]
  },
  "properties": {
    "name": "Smart Dustbin"
  }
}
```

4.2.5.1. Componentes de software implementados

Para la visualización de los datos que son capturados por el nodo recolector de información y pasan por toda la arquitectura LoRaWAN, se ha desarrollado una plataforma que permita visualizar de manera dinámica en un mapa la ubicación del contenedor y las mediciones que arroja cada sensor. Todas las herramientas empleadas para esta plataforma son no propietarias y de libre uso. Esto permite disminuir notablemente los costos de licenciamiento.

La plataforma consta de 5 páginas las cuales se describen a continuación:

- Home: Es la primera página que se muestra al ingresar a la plataforma. En esta página se encuentra una breve descripción del proyecto y permite el acceso a las páginas de registro e ingreso. En el anexo 5 se puede visualizar su implementación.
- Ingreso o Login: Esta página permite el ingreso a la plataforma, se requiere de un usuario previamente registrado. Para su ingreso se requiere del correo y de su respectiva contraseña. En el anexo 6 se puede visualizar su implementación.
- Registro: Esta página permite registrar un nuevo usuario para que pueda ingresar al sistema y hacer uso de todas sus funcionalidades. En el anexo 7 se puede visualizar su implementación.
- Monitoreo: En esta página se podrá monitorear los contenedores de basura y su nivel de residuos que contienen en su interior medidos por los 3 sensores. Esta página es dinámica, razón por la cual no hace falta que el usuario refresque la página para obtener los datos más recientes capturados por los sensores. En el anexo 8 se puede visualizar su implementación.
- Dashboard: En esta página se puede ver un resumen general de todos los contenedores que estén conectados a la solución planteada en la presente investigación. La información se muestra en una tabla, en la cual se puede visualizar el tiempo del dato mostrado, la ubicación en latitud y longitud del contenedor y las mediciones capturadas por cada sensor. En el anexo 9 se puede visualizar su implementación.

CAPÍTULO V

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Componentes de hardware implementados

El resultado de la presente investigación está dado en los componentes de hardware implementados para obtener contenedores de basura inteligentes empleando la red LoRaWAN. Uno de estos componentes de hardware implementado es el gateway; del cual su diagrama se encuentra en el anexo 3. En la figura 25, se puede ver el gateway conectado a la plataforma The Things Network. Su estado es en ejecución, lo cual permite retransmitir paquetes de cualquier nodo LoRaWAN.

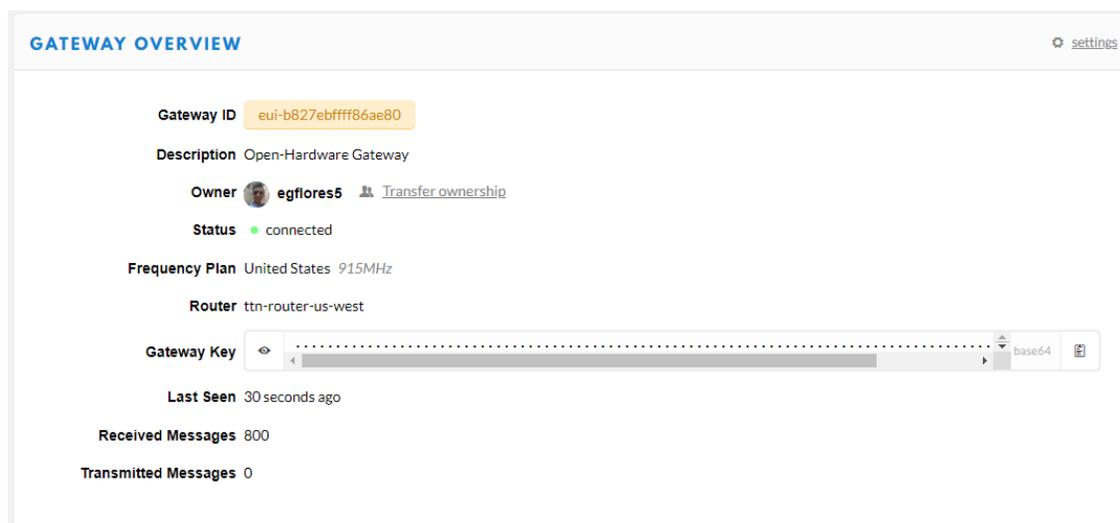


Figura 25. Estado del gateway en The Things Network

En la figura 26, se muestra el servicio que se encuentra ejecutándose en el Raspberry Pi.

```
pi@raspberrypi:~/single_chan_pkt_fwd $ sudo ./single_chan_pkt_fwd
server: .address = router.us.thethings.network; .port = 1700; .enable = 1
server: .address = router.eu.thethings.network; .port = 1700; .enable = 0
Gateway Configuration
Raspberry Gateway (egflores5@espe.edu.ec)
Single Channel Gateway on RPI
Latitude=-0.25401792
Longitude=-78.51515198
Altitude=10
Trying to detect module with NSS=8 DI00=6 Reset=3 Led1=4
SX1276 detected, starting.
Gateway ID: b8:27:eb:ff:ff:86:ae:80
Listening at SF7 on 903.900000 Mhz.
-----
stat update: 2020-01-05 03:21:32 GMT no packet received yet
```

Figura 26. Servicio del gateway ejecutándose en el Raspberry Pi

Otro componente implementando en la presente investigación es el nodo recolector de información, el cual se encuentra en el contenedor de basura monitoreando de manera periódica cada 30 minutos. El diagrama de este componente se encuentra en el anexo 1. En la figura 27, se puede ver el nodo recolector de información conectado a la plataforma The Things Network. Su estado es en ejecución, lo cual permite capturar los datos y enviarlos hacia el gateway.

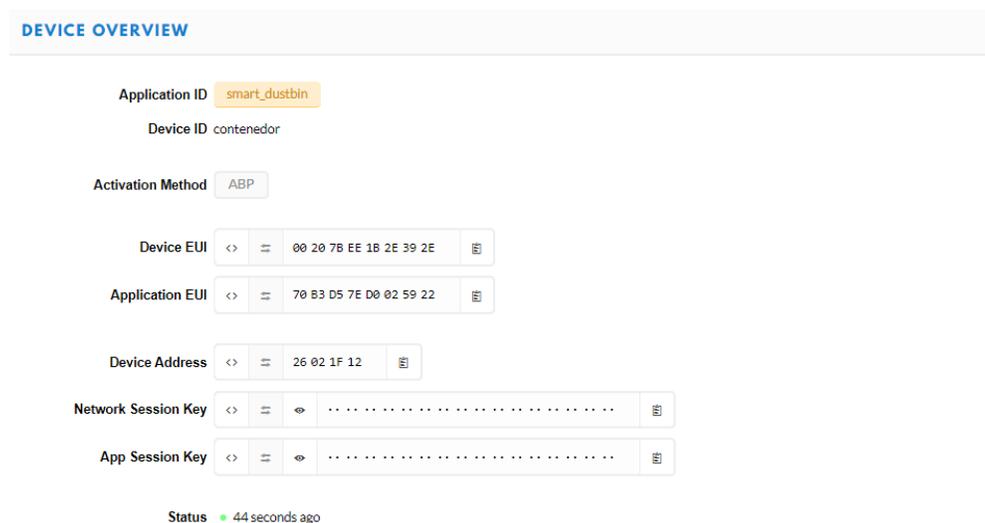


Figura 27. Estado del nodo recolector de información en The Things Network

En la figura 28, se muestra los datos recolectados por el nodo y enviados al gateway. Estos datos son visualizados desde la consola serial a 11500 baudios.

```
rst:0x1 (POWERON_RESET),boot:0x1b (SPI_FAST_FLASH_BOOT)
configsp: 0, SPIWP:0xee
clk_drv:0x00,q_drv:0x00,d_drv:0x00,cs0_drv:0x00,hd_drv:0x00,wp_drv:0x00
mode:DIO, clock div:1
load:0x3fff0018,len:4
load:0x3fff001c,len:928
ho 0 tail 12 room 4
load:0x40078000,len:8424
ho 0 tail 12 room 4
load:0x40080400,len:5868
entry 0x4008069c
Starting

Paquete: 13%7%11;-0.254157;-78.515427
```

Figura 28. Captura de datos del nodo recolector de información.

El mensaje que envía el nodo recolector de información tiene el siguiente formato:

sensor1%sensor2%sensor3;latitud;longitud

La medición del sensor 1 seguido por un separador que es %, a continuación, viene la medición del sensor 2 seguido por el separador “%”, a continuación, viene la medición del sensor 3, separado por “;” viene la latitud que está separada con otro “;” de la longitud.

Evaluando el paquete enviado: 13%7%11;-0.254157;-75.515427

- Sensor 1: 13 cm
- Sensor 2: 7 cm
- Sensor 3: 11 cm
- Latitud: -0.254157
- Longitud: -75.515427

Dado que cada carácter ASCII es representado con un byte, el tamaño del paquete enviado por el nodo recolector de información es de 28 bytes. Una vez que el nodo recolector de información a finalizado la transmisión, el paquete llega al gateway. En la figura 29, se puede visualizar el paquete en el gateway.

```
Packet RSSI: -66, RSSI: -96, SNR: 10, Length: 41 Message: '@...&@..&.....i.'...z
rxpk update: {"rxpk":[{"tmst":3652613948,"freq":903.9,"chan":0,"rfch":0,"stat":1
,"data":"QBIfAiZAEgImAADlA9ifaelgr5uDejbJaVBEru/c1QBKEh+AAPEVneU="}]}
```

Figura 29. Paquete visualizado desde el gateway

En la información del paquete se puede visualizar que el tamaño es 41 bytes, esto se da porque el protocolo LoRaWAN añade 13 bytes adicionales al paquete original, razón por la cual el paquete que fue enviado por el nodo recolector de información es de 28 bytes y con los 13 bytes que añade LoRaWAN forman 41 bytes. Adicional a esto, se puede ver que el mensaje es prácticamente inentendible para el ser humano, esto se da porque LoRaWAN encripta la información de punto a punto con AES-CTR empleando las claves de sesión.

Como parte final, el mensaje llega al servidor de red y se lo puede visualizar como se muestra en la figura 30.

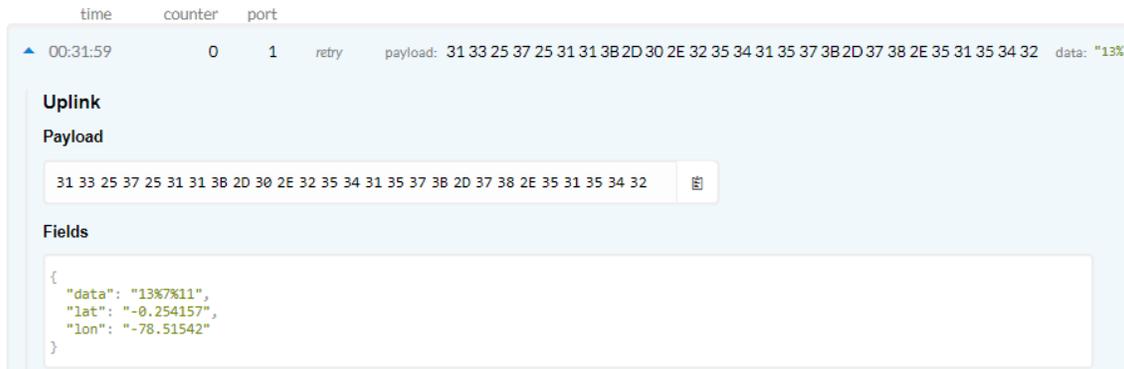


Figura 30. Paquete visualizado desde el servidor de red de TTN.

Adicional a eso, el servidor de red también muestra más información del paquete transmitido, como, por ejemplo, que gateway empleo, la hora exacta y el tiempo que el mensaje estuvo en el aire. En la figura 31, se puede visualizar los detalles del mensaje desde el servidor de red.

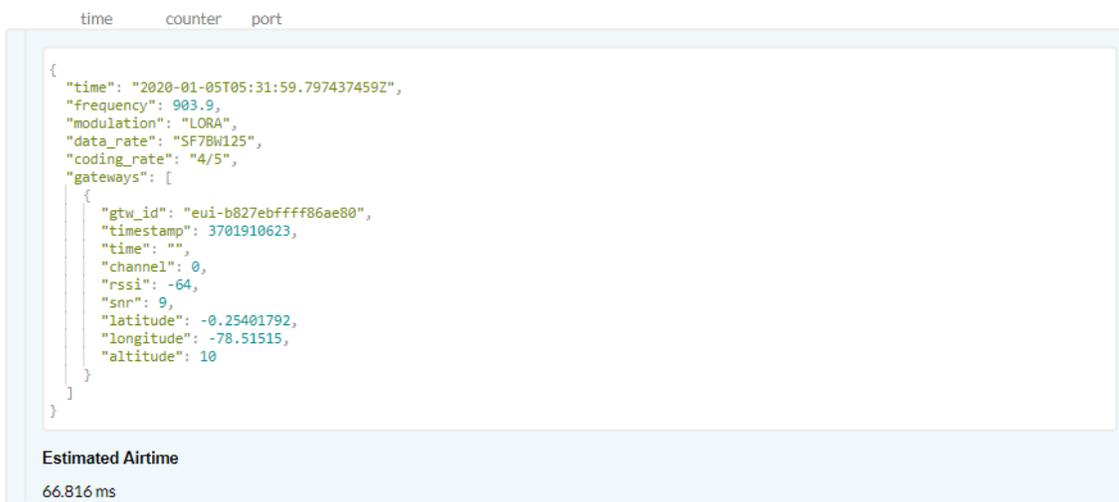


Figura 31. Información detallada del paquete visualizado desde el servidor de red.

5.2. Características de la solución

Todos los componentes empleados para la presente investigación trabajando de manera conjunta brinda las siguientes características.

5.2.1. Distancia.

En esta sección la prueba desarrollada consistió en transmitir 25 paquetes desde distintas ubicaciones geográficas con relación a la ubicación del gateway. Dado que el nodo final cuenta con un módulo GPS se pudo recolectar su latitud y longitud. Los resultados obtenidos demuestran que la solución propuesta tiene una cobertura de máximo 6.07 Km de distancia en línea recta entre el nodo recolector de información y el gateway. En la tabla 6, se puede ver cada uno de los puntos desde los cuales se estableció conexión entre el nodo recolector de información y el gateway. La tabla 6, contiene la latitud, longitud y la distancia entre el nodo y el gateway.

Tabla 6

Puntos de transmisión

ID	Latitud	Longitud	Distancia (metros)
Gateway	-0.303971	-78.531911	
1	-0.303228	-78.532085	85 m
2	-0.307596	-78.532721	409 m
3	-0.309522	-78.532957	619 m
4	-0.309302	-78.533926	633 m
5	-0.308285	-78.534078	536 m
6	-0.309757	-78.534507	704 m
7	-0.311298	-78.534148	850 m
8	-0.310375	-78.536488	870 m
9	-0.310328	-78.537645	929 m
10	-0.311026	-78.537569	991 m
11	-0.313141	-78.53733	1.18 Km
12	-0.313076	-78.53847	1.24 Km
13	-0.312277	-78.54200	1.45 Km
14	-0.309056	-78.545111	1.57 Km
15	-0.304095	-78.544291	1.39 Km
16	-0.30357	-78.546461	1.62 Km

CONTINÚA 

17	-0.303332	-78.549089	1.91 Km
18	-0.303013	-78.550917	2.12 Km
19	-0.301597	-78.555478	2.65 Km
20	-0.298808	-78.559807	3.17 Km
21	-0.294397	-78.567652	4.42 Km
22	-0.292297	-78.574093	4.89 Km
23	-0.290781	-78.579182	5.45 Km
24	-0.290548	-78.58066	5.62 Km
25	-0.288242	-78.583867	6.07 Km

5.2.2. Velocidad.

El tiempo de transmisión entre el nodo recolector de información y el gateway es directamente proporcional a la distancia entre el nodo y el gateway. En base a los datos recolectados y tomando en cuenta que todos los paquetes tuvieron el mismo tamaño; el cual fue 41 bytes, con esta información y con el tiempo en el aire del mensaje que provee la plataforma TTN se logró calcular la velocidad de transmisión en cada punto. En la tabla 7, se recolectó la distancia y el tiempo en cada punto de transmisión, además de su velocidad.

Tabla 7

Tabla de velocidad de transmisión entre el nodo y el gateway

Distancia (metros)	Tiempo (milisegundos)	Velocidad (KiloByte/segundo)
85 m	65.12 ms	0.6296
409 m	65.47 ms	0.6262
536 m	65.51 ms	0.6259
619 m	65.55 ms	0.6255
633 m	65.55 ms	0.6255
704 m	65.59 ms	0.6251
850 m	66.01 ms	0.6211
870 m	66.01 ms	0.6211

CONTINÚA 

929 m	66.09 ms	0.6204
991 m	66.11 ms	0.6202
1180 m	66.19 ms	0.6194
1240 m	66.31 ms	0.6183
1390 m	66.31 ms	0.6183
1450 m	66.33 ms	0.6181
1570 m	66.37 ms	0.6177
1620 m	66.38 ms	0.6177
1910 m	66. 58 ms	0.6158
2120 m	66. 96 ms	0.6123
2650 m	66.99 ms	0.6120
3170 m	67.20 ms	0.6101
4420 m	67. 45 ms	0.6079
4890 m	67. 63 ms	0.6062
5450 m	67.87 ms	0.6041
5620 m	67.98 ms	0.6031
6070 m	68.12 ms	0.6019

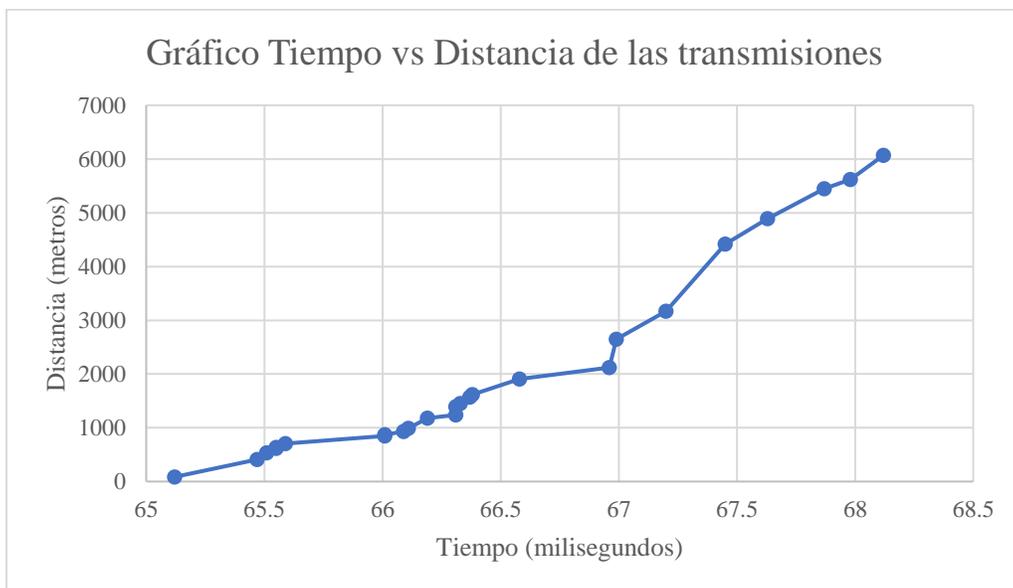


Figura 32. Tiempo vs Distancia de las transmisiones

5.2.3. Consumo energético.

5.2.3.1. Nodo recolector de información.

Para realizar la medición de cuanta energía eléctrica consume el nodo recolector de información se empleó un multímetro y se lo coloco en serie a la alimentación de circuito. El nodo cuenta con dos estados, el estado de reposo se da cuando los sensores se encuentran totalmente apagados. El estado en transmisión se da cuando el nodo está listo para transmitir los datos hacia el gateway y por lo tanto se debe encender los tres sensores. En base a estos estados, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 8.

Consumo energético del nodo recolector de información

Situación	Amperaje (mA)	Potencia (Watts)
En reposo	110	0.550
En Transmisión	150	0.750

En los resultados obtenidos se puede evidenciar una diferencia de 40 mA y de 0.2 Watts entre el estado de reposo y el estado en transmisión. Esto ahorro se da gracias al diseño del circuito propuesto en la presente investigación que busca mantener apagados lo sensores cuando no se está transmitiendo.

5.2.3.2. Gateway.

El gateway al estar implementado en un Raspberry Pi 3 B+, el consumo de energía viene dado por las características técnicas que el fabricante provee. Dado que al funcionar como un gateway el consumo de CPU no sobrepasa el 5%, es equivalente a estar en reposo, por lo tanto, el consumo de energía es de 240 mA.

5.3. Especificaciones técnicas.

5.3.1. Nodo recolector de información.

Tabla 9

Características técnicas del nodo recolector de información.

Características	Valor
Tipo de comunicación	LoRa V1
Clase	A
Frecuencia	903.9 MHz
Sub-Banda	2
Canal	8
Factor de propagación	SF7
Ancho de banda	125 kHz
Velocidad de transmisión (Calculado)	6.17 kbps
Alimentación	5v
Intensidad (Medido)	110 mA en reposo 150 mA en transmisión
Potencia (Calculado)	0.550 W en reposo 0.750 W en transmisión
Cantidad máxima de sensores	4
Distancia máxima de cobertura (Calculado)	6070 metros
Interfaces	18 GPIO usados 7 GPIO libres 1 x 5v Salida 1 x 3.3v Salida 1 x microUSB

5.3.2. Gateway.

Tabla 10

Características técnicas gateway

Características	Valor
Tipo de comunicación	LoRa V1
Transmisión	Un solo canal
Frecuencia	903.9 MHz
Velocidad de transmisión (Calculado)	6.17 kbps
Alimentación	5v
Consumo de energía	240 mA
Distancia máxima de cobertura (Calculado)	6070 metros
Conexiones	LAN, WiFi
Gestión del dispositivo	SSH o GUI

5.4. Conclusiones.

- La presente investigación ha demostrado que la implementación de contenedores de basura inteligentes es una solución viable empleando la red LoRaWAN. Esta solución busca evitar presenciar contenedores que se encuentren al máximo de su capacidad de almacenaje, ya que, mediante el monitoreo de los contenedores inteligentes, la entidad correspondiente podrá tomar medidas al respecto y evitar la contaminación y la propagación de enfermedades por tener residuos al aire libre.
- La solución presentada busca resolver un problema social y ambiental empleando un método distinto de comunicación a los que ya se han usado para resolver el mismo problema basándose en los principios del Internet de las Cosas y de las ciudades inteligentes, para lo cual el protocolo LoRa es una alternativa ideal para lograr una comunicación de largo alcance con un bajo consumo energético. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que el tamaño máximo de paquete es de 243 bytes.
- La convergencia de los distintos componentes de hardware y software desarrollados permitieron tener un contenedor de basura inteligente que permite visualizar de manera periódica su capacidad disponible desde una plataforma web.
- La presente investigación se la desarrollo en la frecuencia de 903.9 MHz, con un factor de propagación de SF7 que garantiza la máxima velocidad en un ancho de banda de 125 kHz, sin embargo; es más sensible al ruido. Si se desea tener transmisiones que sean menos propensas al ruido se puede aumentar el factor de propagación, pero la velocidad de transmisión se verá afectada notablemente.
- Las pruebas realizadas arrojaron que la solución tiene un alcance máximo de 6070 metros a una velocidad de 6.17 kbps con un consumo de energía en reposo de 0.550 Wh y en transmisión de 0.755 Wh por parte del nodo recolector de información.
- La presente investigación fue llevada a cabo únicamente con software y hardware libre, esto permitió reducir notablemente los costos de desarrollo e implementación.

- El diseño del nodo recolector de información permite reducir notablemente el consumo de energía, ya que al tener 3 sensores se evitó que estén todo el tiempo encendidos. De manera que se enciendan antes que empiece la transmisión y se apaguen una vez finalizada esta. De igual manera, se redujo el número de pines usados en la tarjeta de desarrollo del nodo; esto se lo realizó mediante el empleo de un multiplexor, reduciendo a la mitad de los pines necesarios.
- Para la implementación del servidor de red y el servidor de aplicaciones se empleó la plataforma “The Things Network”, la cual ofrece planes gratuitos que permiten conectar el nodo recolector de información con la aplicación que se muestra al usuario, la limitante de este servicio es que al ser gratuito permite únicamente 30 segundos de tiempo en el aire de todos los mensajes de subida, lo que da un aproximado de 500 mensajes empleado el factor de propagación SF7 y 10 mensajes de bajada.

5.5. Recomendaciones.

- Para empezar en el mundo LoRaWAN o si se desea realizar una prueba de concepto de esta tecnología, se recomienda emplear la plataforma “The Things Network”, ya que es una opción ideal para ahorrar tiempo y recursos en la implementación del servidor de red y de aplicaciones, de tal manera que se pueda centrar en el desarrollo del prototipo y una vez que se obtenga algo funcional, se pueda implementar un propio servidor de red y aplicaciones.
- A la hora de usar el protocolo LoRaWAN se debe ser cuidadoso en la frecuencia empleada, ya que se ha establecido una frecuencia por defecto para cada región. En Asia se emplea 433 MHz, en Europa 868 MHz y en América 915 MHz.
- Para determinar el factor de propagación a usarse se debe realizar un análisis de lo que busca la solución. Si se desea mayor velocidad de transmisión se deberá emplear un factor de propagación bajo y si se desea priorizar una baja sensibilidad al ruido se puede emplear un factor de propagación alto.
- LoRaWAN puede ser empleada en soluciones de diferentes campos, por ejemplo, en la agricultura sería una solución óptima para el monitoreo de los cultivos, o también para dar el paso hacia las ciudades inteligentes a un bajo costo.

BIBLIOGRAFÍA

- Abhinav, & Rupesh, N. (2016). FastCollect: Offloading Generational Garbage Collection to integrated GPUs. *2016 International Conference on Compilers, Architectures, and Synthesis of Embedded Systems (CASES)*.
- Albert, P., & Florian, H. (2017). Practical Limitations for Deployment of LoRa. *IEEE International Workshop on Measurement and Networking (M&N)*.
- Alexandru, L., & Valentin, P. (2017). LoRa™ wide-area networks from an Internet of Things perspective. *9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*.
- Andrew, W., Peter, K., Hadi, L., Alan, T., Ali, A., & Niall, S. (2016). Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks. *IEEE SENSORS*.
- Arduino. (2019). *Arduino*. Retrieved from <https://www.arduino.cc/>
- Candia, A., Represa, S. N., Giuliani, D., Luengo, M. Á., Porta, A. A., & Marrone, L. A. (2018). Solutions for SmartCities: proposal of a monitoring system of air quality based on a LoRaWAN network with low-cost sensors. *2018 Congreso Argentino de Ciencias de la Informática y Desarrollos de Investigación (CACIDI)*.
- Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Michele, Z. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars. *IEEE Wireless Communications 23*.
- Chandrashekhar, R., & Satish, D. (2017). Intelligent Transportation System for. *International Conference on Communication and Signal Processing*, 1602-1605.
- Draz, U., Ali, T., Khan, J. A., Majid, M., & Yasin, S. (2017). A real-time smart dumpsters monitoring and garbage collection system. *2017 Fifth International Conference on Aerospace Science & Engineering (ICASE)*.
- Ghadage, S. A., & Doshi, N. A. (2017). IoT based garbage management (Monitor and acknowledgment) system: A review. *2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)*.
- Gualichicomín, D. (2018). Plan de gestión integral de residuos sólidos no peligrosos para el canto Mejía, basado en el cálculo de rutas óptimas.
- Idwan, S., Zubairi, J. A., & Mahmood, I. (2016). Smart Solutions for Smart Cities: Using Wireless Sensor Network for Smart Dumpster Management. *2016 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*.
- Ingrassia, V. (2018, 7 1). Cómo funciona el primer contenedor de residuos inteligente. Buenos Aires, Argentina.
- Londoño, O., Maldonado, L., & Calderón, L. (2016). *Olga Londoño, Luis Maldonado y Licky Calderón*. Olga Londoño, Luis Maldonado y Licky Calderón.
- LoRaServer. (2019). *LoRaServer*. Retrieved from <https://www.loraserver.io/>
- LoRaWAN. (2019, 05 07). *LoRaWAN*. Retrieved from <https://lorawan.es/>
- Loriot, M., Aljer, A., & Shahrour, I. (2017). Analysis of the use of LoRaWAN technology in a large-scale smart city demonstrator. *2017 Sensors Networks Smart and Emerging Technologies (SENSET)*.

- Memon, S. K., Shaikh, F. K., Mahoto, N. A., & Memon, A. A. (2019). IoT based smart garbage monitoring & collection system using WeMos & Ultrasonic sensors. *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*.
- Muyunda, N., & Ibrahim, M. (2017). Arduino-based smart garbage monitoring system: Analysis requirement and implementation. *2017 International Conference on Computer and Drone Applications (IConDA)*.
- Nehete, P., Jangam, D., Barne, N., Bhoite, P., & Jadhav, S. (2018). Garbage Management using Internet of Things. *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*.
- Oratile, K., Basse, I., & Adnan, A.-M. (2017). IoT devices and applications based on LoRa/LoRaWAN. *43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*.
- RaspberryPi. (2019). *RaspberryPi*. Retrieved from <https://www.raspberrypi.org/>
- Saha, H. N., Gon, S., Nayak, A., Kundu, S., & Moitra, S. (2018). Iot Based Garbage Monitoring and Clearance Alert System. *2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*.
- Sahoo, U. K., & Patnaik, B. (2017). Design and implementation of remote monitoring system of solar lanterns, based on lorawan and cloud technology. *2017 International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*.
- sparkfun. (2019, 05 07). *sparkfun*. Retrieved from sparkfun: <https://www.sparkfun.com/>
- Vaishnav, V., Kuechler, B., & Petter, S. (2013). Design Science Research in Information Systems.
- Abhinav, & Nasre, R. (2016). FastCollect: Offloading generational garbage collection to integrated GPUs. *Proceedings of the International Conference on Compilers, Architectures and Synthesis for Embedded Systems, CASES 2016*. <https://doi.org/10.1145/2968455.2968520>
- Bouskela, M., Casseb, M., Bassi, S., Luca, C. De, & Facchina, M. (2016). *La ruta hacia las Smart Cities* (p. 148). p. 148. Retrieved from <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/7743/La-ruta-hacia-las-smart-cities-Migrando-de-una-gestion-tradicional-a-la-ciudad-inteligente.pdf>
- Cabero, J., Duarte, A., & Barroso, J. (2006). La piedra angular para la incorporación de los medios audiovisuales, informáticos y nuevas tecnologías en los contextos educativos: la formación y el perfeccionamiento del profesorado. *EduTec. Revista Electrónica de Tecnología Educativa*, (8). <https://doi.org/10.21556/edutec.1998.8.569>
- Candia, A., Represa, S. N., Giuliani, D., Luengo, M. A., Porta, A. A., & Marrone, L. A. (2018). Solutions for SmartCities: Proposal of a monitoring system of air quality based on a LoRaWAN network with low-cost sensors. *Congreso Argentino de Ciencias de La Informatica y Desarrollos de Investigacion, CACIDI 2018*. <https://doi.org/10.1109/CACIDI.2018.8584183>
- Cárdenas, M., González, D., & Retamal, C. (2018). *Protocolo LoRa para implementacion de redes IoT en smart cities*.
- CEPAL. (2015). *TIC y medio ambiente*.
- Cisco. (2019). *Redes Empresariales*.
- Dasy Gualichicomín. (2018). *Plan de gestion integral de residuos solidos no peligrosos para el canto*

Mejía, basado en el cálculo de rutas óptimas. ESPE.

- Draz, U., Ali, T., Khan, J. A., Majid, M., & Yasin, S. (2018). A real-time smart dumpsters monitoring and garbage collection system. *2017 5th International Conference on Aerospace Science and Engineering, ICASE 2017*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICASE.2017.8374268>
- Espressif. (2019). Overview _ Espressif Systems. Retrieved October 13, 2019, from <https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp32-devkitc/overview>
- Gemalto, & Semtech. (2017). *LoRaWAN™ security a white paper prepared for the LoRa alliance™ full end-to-end encryption for iot application providers.*
- Ghadage, S. A., & Doshi, M. N. A. (2018). IoT based garbage management (Monitor and acknowledgment) system: A review. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Sustainable Systems, ICISS 2017*, 642–644. <https://doi.org/10.1109/ISS1.2017.8389250>
- González, M. (2019). *Estudio de NB - IoT y comparativa con otras tecnologías LPWAN.*
- Habitat III. (2015). *Temas habitat III 21-ciudades inteligentes.* Retrieved from http://indiansmartcities.in/downloads/CONCEPT_NOTE_-
- Hallard. (2018). Puerta de enlace LoRaWAN de un solo canal. Retrieved October 16, 2019, from https://github.com/hallard/single_chan_pkt_fwd
- Hevner, A., R, A., March, S., T, S., Park, Park, J., ... Sudha. (2004). Design Science in Information Systems Research. *Management Information Systems Quarterly*, 28, 75-.
- HOPERF. (2019). *Rf96/97/98.*
- Idiart, M. (2018). *Redes Colaborativas vs Redes Narrowband.*
- Idwan, S., Zubairi, J. A., & Mahmood, I. (2016a). Smart Solutions for Smart Cities: Using Wireless Sensor Network for Smart Dumpster Management. *2016 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*, 493–497. <https://doi.org/10.1109/CTS.2016.0092>
- Idwan, S., Zubairi, J. A., & Mahmood, I. (2016b). Smart Solutions for Smart Cities: Using Wireless Sensor Network for Smart Dumpster Management. *2016 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*, 493–497. <https://doi.org/10.1109/CTS.2016.0092>
- Infobae. (2019). Cómo funciona el primer contenedor de residuos inteligente - Infobae. Retrieved October 17, 2019, from <https://www.infobae.com/tendencias/innovacion/2018/07/01/como-funciona-el-primer-contenedor-de-residuos-inteligente/>
- Khutsoane, O., Isong, B., & Abu-Mahfouz, A. M. (2017). IoT devices and applications based on LoRa/LoRaWAN. *Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017-January*, 6107–6112. <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8217061>
- Lavric, A., & Popa, V. (2017). LoRa™ Wide-Area Networks from an Internet of Things perspective. *Proceedings of the 9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2017, 2017-January*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ECAI.2017.8166397>
- Londoño, O. L., Luis, P., Maldonado, F., Liccy, G., & Calderón Villafañez, C. (2014). *GUÍA PARA CONSTRUIR ESTADOS DEL ARTE.*
- LoRa-Alliance. (2015a). *A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™ What is it?*
- LoRa-Alliance. (2015b). *LoRaWAN Specification 1.0.*

- LoRaWAN y LoRa. (2019). Retrieved October 17, 2019, from <https://lorawan.es/>
- Loriot, M., Aljer, A., & Shahrour, I. (2017). Analysis of the use of lorawan technology in a large-scale smart city demonstrator. *2017 Sensors Networks Smart and Emerging Technologies, SENSET 2017, 2017-January*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/SENSET.2017.8125011>
- Memon, S. K., Karim Shaikh, F., Mahoto, N. A., & Aziz Memon, A. (2019). IoT based smart garbage monitoring collection system using WeMos Ultrasonic sensors. *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies, ICoMET 2019*. <https://doi.org/10.1109/ICOMET.2019.8673526>
- Muyunda, N., & Ibrahim, M. (2018). Arduino-based smart garbage monitoring system: Analysis requirement and implementation. *1st International Conference on Computer and Drone Applications: Ethical Integration of Computer and Drone Technology for Humanity Sustainability, IConDA 2017, 2018-January*, 28–32. <https://doi.org/10.1109/ICONDA.2017.8270394>
- Nehete, P., Jangam, D., Barne, N., Bhoite, P., & Jadhav, S. (2018). Garbage Management using Internet of Things. *Proceedings of the 2nd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2018*, 1454–1458. <https://doi.org/10.1109/ICECA.2018.8474659>
- Ortí, C. B. (2011). *Las tecnologías de la información y comunicación (T.I.C.)*.
- Raspberry. (2019). Raspberry Pi 3 Modelo B + - Raspberry Pi. Retrieved October 24, 2019, from <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>
- Raspbian. (2019). Raspbian. Retrieved October 24, 2019, from <https://www.raspbian.org/>
- Raut, C. M., & Devane, S. R. (2018). Intelligent transportation system for smartcity using VANET. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Communication and Signal Processing, ICCSP 2017, 2018-Janua*, 1602–1605. <https://doi.org/10.1109/ICCSP.2017.8286659>
- Rush, C. (2016). *Programming the Photon : getting started with the Internet of Things*.
- Saha, H. N., Gon, S., Nayak, A., Kundu, S., & Moitra, S. (2019). Iot Based Garbage Monitoring and Clearance Alert System. *2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference, IEMCON 2018*, 204–208. <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2018.8614840>
- Sahoo, U. K., & Patnaik, B. (2018). Design and implementation of remote monitoring system of solar lanterns, based on lorawan and cloud technology. *Proceedings of the International Conference on Computing Methodologies and Communication, ICCMC 2017, 2018-January*, 129–133. <https://doi.org/10.1109/ICCMC.2017.8282659>
- Semtech. (2019). ¿Qué es lora? El | Tecnología Semtech LoRa | Semtech. Retrieved November 9, 2019, from <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>
- Texas Instruments. (1998). *Data Selectors/Multiplexers datasheet*.
- Tikhvinsky, V. (2018). *LPWAN Narrowband Technologies (LoRaWAN, SigFox, etc.) for M2M Networks and Internet of Things Design*. Retrieved from <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/LPWAN-low-power-wide-area-network>
- TTN. (2019a). Gateways. Retrieved October 16, 2019, from <https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/>
- TTN. (2019b). The Things Network. Retrieved November 9, 2019, from <https://www.thethingsnetwork.org/>

- U-Blox. (2011). *NEO-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet* . Retrieved from www.u-blox.com
- Valarezo, F., & Criollo, A. (2017). *Diseño y estudio del uso de una red LPWAN (Low Power Wide Área Network) para la optimización de la medición, comunicación y corrección de errores, en el consumo de agua potable: Caso de estudio en urbanizaciones ubicadas en la periferia de la ciudad de Gu.*
- Vallina, M., & Miguel. (2013). *Infraestructuras de redes de datos y sistemas de telefonía*. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=lkBhTrHLBIEC&pgis=1>
- Valtueña, J. (2002). Enciclopedia de la Ecología y la Salud. In *Editorial Safeliz*.
- Vasconcelos Santillán, J. (2015). *Tecnologías de la información (2a. ed.)*. Larousse - Grupo Editorial Patria.
- Vértice, E. (2007). *Gestión medioambiental: manipulación de residuos y productos químicos*. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=0FaR35BOfEQC&pgis=1>
- Vigatec. (2018). *Basureros inteligentes para Smarts Cities*.