



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**Prototipo de solución para monitoreo y control remoto
de una red de distribución de agua potable usando la
tecnología LoRa WAN**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR

Martin Daniel GONZALES VICENTE

ASESOR

Mg. Ricardo RODRIGUEZ YAURI

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Gonzales, M. (2022). *Prototipo de solución para monitoreo y control remoto de una red de distribución de agua potable usando la tecnología LoRa WAN*. [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Martin Daniel Gonzales Vicente
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	71259659
URL de ORCID	No Aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Ricardo Rodriguez Yauri
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	41900467
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-9884-9317
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Rejis Renato Paredes Peñafiel
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06758404
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Carlos Alberto Chiri Huanca
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09293427
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Wilbert Chavez Irazabal
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08121733
Datos de investigación	

Línea de investigación	C.0.3.25 Tecnología de información y aplicaciones de sistemas
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	No aplica
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Calle: Av. Universitaria con Av. Venezuela Latitud: -12.0571807 Longitud: -77.0859145
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Setiembre 2020 - Noviembre 2020
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería eléctrica, Ingeniería Electrónica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01 Telecomunicaciones https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.05



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



UNMSM

Firmado digitalmente por PAREDES
PENAFIEL Rejis Renato FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 30.12.2022 21:27:37 -05:00



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL Nº 032/FIEE-EPIE/2022

Los suscritos Miembros del Jurado, nombrados por la Comisión Ejecutiva del Programa de Perfeccionamiento Profesional de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha, bajo La Presidencia del **MG. REJIS RENATO PAREDES PEÑAFIEL** integrado por el **MG. CARLOS ALBERTO CHIRI HUANCA**, el **MG. WILBERT CHAVEZ IRAZABAL** y el **MG. RICARDO RODRIGUEZ YAURI**.

Después de escuchar la Sustentación de Trabajo de Suficiencia Profesional del **Bach. MARTIN DANIEL GONZALES VICENTE** con código N° **09190147** que para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico sustentó el Trabajo de Suficiencia Profesional titulado **PROTOTIPO DE SOLUCIÓN PARA MONITOREO Y CONTROL REMOTO DE UNA RED DE DISTRIBUCION DE AGUA POTABLE USANDO LA TECNOLOGÍA LORA WAN**.

El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió aprobar otorgándole el calificativo de **quince (15)**.

Ciudad Universitaria, 21 de diciembre de 2022

MG. REJIS RENATO PAREDES PEÑAFIEL
Presidente de Jurado

MG. CARLOS ALBERTO CHIRI HUANCA
Miembro Jurado

MG. WILBERT CHAVEZ IRAZABAL
Miembro Jurado

MG. RICARDO RODRIGUEZ YAURI
Miembro Asesor



**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN
MARCOS**
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA

Informe de
evaluación de originalidad.

1. Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica.
2. Escuela Profesional de Ingeniería de Eléctrica.
3. Emisor del Informe el director de la Escuela Profesional de Ingeniería de Electrónica.
4. Operador del programa informático de similitudes: Rejis Renato Paredes Peñafiel.
5. Documento evaluado: Trabajo de Suficiencia Profesional para título de (pregrado)
PROTOTIPO DE SOLUCIÓN PARA MONITOREO Y CONTROL REMOTO DE UNA RED DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE USANDO LA TECNOLOGÍA LORA WAN
6. Autor de la tesis: MARTIN DANIEL GONZALEZ VICENTE
Fecha de aplicación de recepción del documento: 01-02-2022
7. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes: 01-02-2022
8. Software utilizado: Turnitin.
9. Configuración del programa detector de similitudes:
 - Excluye citas.
 - Excluye bibliografía.
 - Excluye cadenas menores de 40 palabras
10. Porcentaje de similitudes según programa detector: seis por ciento – 6%
11. Fuentes originales de las similitudes encontradas.

1. cybertesis.unmsm.edu.pe	2% Fuente de Internet
2. Submitted to Universidad de Alicante	1% trabajo de estudiante
3. hdl.handle.net	1% Fuente de Internet
4. telos.fundaciontelefonica.com	1% Fuente de Internet
5. dspace.esPOCH.edu.ec	1% Fuente de Internet
6. Submitted to University of Greenwich	<1% trabajo de estudiante
7. repositorio.espe.edu.ec	<1% Fuente de Internet
8. www.springerprofessional.de	<1% Fuente de Internet
9. repositorio.unal.edu.co	<1% Fuente de Internet
10. Submitted to universidad internacional de la Rioja	
1. Observaciones: Ninguna.
13. Calificación de originalidad.
 - Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones.
14. Fecha del informe: 28 de marzo de 2022.

Atentamente,


Mg. Paredes Peñafiel, Rejis Renato
Director de la EPIE

RESUMEN

A través del presente documento se muestra cómo la tecnología IoT (Internet de las cosas) se encuentra al alcance de nuestras manos y como su aplicación, en este caso particular, dentro de un sistema de distribución del agua potable, le ayudaría a la empresa proveedora de este servicio a mejorar los problemas que enfrenta al día de hoy: baja eficacia en el control de la red de distribución, vandalismo de parte de terceros y atención ante problemas eventuales (como las fugas de agua) con tiempo de respuesta demasiado largos, lo cual genera pérdidas del recurso hídrico así como pérdidas en el ámbito económico e incómodos perjuicio en los clientes del servicio.

En la búsqueda por la mejor solución de ingeniería, y haciendo una comparativa detalla entre las diferentes alternativas IoT disponibles en la actualidad, se presenta la propuesta del uso de un sistema LORA-WAN para el monitoreo y el control remoto del agua potable, el cual aportaría múltiples beneficios al servicio de agua potable: mejoras en la gestión del recurso hídrico, mayor eficacia en cuanto al tiempo de respuesta ante cortes y reducción de costos antes eventos imprevistos, entre muchas otros beneficios, como se verá a lo largo del documento.

Palabras clave: IoT, LPWAN, LORA-WAN, Arduino, Ubidots.

ABSTRACT

This document shows how IoT (Internet of Things) technology is at our fingertips and how its application, in this particular case, within a drinking water distribution system, would help the supplier company of this service to improve the problems it faces today: low efficiency in the control of the distribution network, vandalism by third parties and attention to eventual problems (such as water leaks) with too long response times, which generates losses of the water resource as well as losses in the economic sphere and uncomfortable damage to the clients of the service.

In the search for the best engineering solution, and making a detailed comparison between the different IoT alternatives available today, the proposal for the use of a LORA-WAN system for remote monitoring and control of drinking water is presented, which It would bring multiple benefits to the drinking water service: improvements in water resource management, greater efficiency in response time to outages and cost reduction before unforeseen events, among many other benefits, as will be seen throughout the document.

Keywords: IoT, LPWAN, LORA-WAN, Arduino, Ubidots.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
TABLA DE CONTENIDO	iii
LISTA DE TABLAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo del Informe.....	1
1.2 Estructura del Informe.....	1
CAPÍTULO II	2
INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD...	2
2.1 Institución Donde se Desarrolló la Actividad	2
2.2 Periodo de Duración de la Actividad	2
2.3 Finalidad y Objetivos de la Entidad	2
2.4 Razón social.....	3
2.5 Dirección Postal	3
2.6 Correo Electrónico del Profesional a Cargo	3
CAPÍTULO III	4
DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD.....	4
3.1 Organización de la Actividad	4
3.2 Finalidad y Objetivos de la Actividad	4
3.2.1 Finalidad	4
3.2.2 Objetivos.....	5
3.3 Problemática	5

3.3.1 Problema General.....	5
3.3.2 Problemas Específicos	5
3.3.3 Justificación e Importancia de la Investigación	6
3.4 Metodología.....	7
3.4.1 Bases Teóricas	7
3.4.2 Marco Conceptual.....	8
3.5 Procedimiento	20
3.6 Resultados de la Actividad	24
CAPÍTULO IV.....	25
CONCLUSIONES	25
4.1 Justificación.....	25
4.2 Metodología Aplicada.....	27
4.2.1 Evaluación Económica.....	27
4.2.2 Evaluación Técnica.....	29
4.3 Descripción de la Implementación.....	34
4.3.1 Programación del Arduino Uno para lectura de sensores.....	34
4.3.2 Utilización del módulo Dragino Lora Shield para comunicación LoRa	37
4.3.3 Configuración de nodo con sensor de caudal y electroválvula	39
4.3.4 Configuración del gateway LoRaWAN.....	42
4.3.5 Servidor en la nube UBIDOTS	47
4.3.6 Monitoreo de caudal y consumo de agua	49
4.3.7 Monitoreo y control de caudal	52
4.4 Conclusiones.....	55
CAPÍTULO V.....	56
RECOMENDACIONES.....	56
CAPÍTULO VI.....	57
BIBLIOGRAFÍA	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Características técnicas de la tecnología WiFi	10
Tabla 2: Características técnicas de la tecnología BLE	12
Tabla 3: Características técnicas de la tecnología ZigBee	12
Tabla 4: Características técnicas de la tecnología NB-IoT	15
Tabla 5: Características técnicas de la tecnología SigFox	17
Tabla 6: Características técnicas de la tecnología LoRaWAN	18
Tabla 7: Capacidades de las tecnologías inalámbricas	23
Tabla 8: Cotización del nodo final para monitoreo de caudal	27
Tabla 9: Cotización del nodo administrativo para monitoreo y control de caudal	28
Tabla 10: Cotización del nodo receptor	28
Tabla 11: Comparación de sensores de caudal	29
Tabla 12: Comparación de modelos de placas Arduino	30
Tabla 13: Comparación de tecnologías LPWAN	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pronóstico del número de dispositivos IoT	9
Figura 2: Arquitectura IoT basado en WiFi	11
Figura 3: Arquitectura BLE	12
Figura 4: Arquitectura ZigBee	14
Figura 5: Arquitectura NB-IoT	14
Figura 6: Número de dispositivos IoT LPWAN	16
Figura 7: Arquitectura SigFox	17
Figura 8: Arquitectura LoRaWAN	19
Figura 9: Abanico de sensores IoT	19
Figura 10: Comparación de tecnologías inalámbricas	21
Figura 11: Arquitectura de red LoRa	25
Figura 12: Diagrama de bloques del nodo usuario final	26
Figura 13: Diagrama de bloques del nodo administrativo	26
Figura 14: Placa Arduino con microcontrolador integrado	31
Figura 15: Placa Arduino con microcontrolador integrado	33
Figura 16: Diagrama de flujo para lectura de caudal y consumo de agua	35
Figura 17: Código para lectura de caudal y volumen	36
Figura 18: Lectura de caudal y volumen desde puerto serial de Arduino	37
Figura 19: Código para lectura de caudal y volumen	38
Figura 20: Nodo de usuario final implementado	39
Figura 21: Circuito para accionar válvula de 12Vdc	40
Figura 22: Código para recibir mensajes LoRa y encender electroválvula	41
Figura 23: Nodo administrativo implementado	41
Figura 24: Diagrama de flujo del gateway LoRa	42
Figura 25: Código para habilitar módulo WiFi ESP8266	43
Figura 26: Código del gateway LoRa: definición de constantes y variables	44
Figura 27: Código del gateway LoRa: envío de mensajes al servidor	45
Figura 28: Código del gateway LoRa: solicitud de mensajes al servidor	45

Figura 29: Código del gateway LoRa: envío paquetes al nodo LoRa	46
Figura 30: Gateway LoRa implementado	47
Figura 31: Plataforma Ubidots	47
Figura 32: Gateway enviando comandos de lectura/escritura al servidor	48
Figura 33: Puesta en marcha de nodo de usuario final	49
Figura 34: Visualización de datos en Ubidots	50
Figura 35: Gráfico de la variación del volumen en Ubidots	50
Figura 36: Gráfico de la variación del caudal en Ubidots	51
Figura 37: Gráficos de variación de caudal y volumen en Ubidots	51
Figura 38: Puesta en marcha de nodo administrativo	52
Figura 39: Válvula en OFF en Ubidots – Sin flujo de agua	53
Figura 40: Válvula en ON en Ubidots – Hay flujo de agua	53
Figura 41: Válvula en ON en sistema – Hay flujo de agua	54

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo del Informe

El presente informe tiene como objetivo realizar el desarrollo de un circuito electrónico que permita monitorear y controlar el flujo de agua remotamente, haciendo uso de la tecnología de red inalámbrica LoRa WAN, y que sirva como prototipo para la gestión de este recurso hídrico en una red de distribución de agua potable.

1.2 Estructura del Informe

El capítulo 1 es introductorio y describe el tema y el objetivo del informe.

El capítulo 2 detalla la información de la institución donde se desarrolló la actividad.

El capítulo 3 presenta la problemática de la investigación, los objetivos y finalidad de la actividad. En este capítulo se presenta además las bases teóricas y marco conceptual sobre los que se fundamenta el informe, así como el procedimiento y resultados de la actividad.

El capítulo 4 presenta la metodología aplicada a la actividad y las conclusiones.

El capítulo 5 detalla las aportaciones y recomendaciones para futuras investigaciones en la misma línea temática propuesta de este informe.

El capítulo 6 presenta la bibliografía del informe, distinguiéndose entre los diferentes tipos de publicaciones utilizadas.

El capítulo 7 presenta los anexos.

CAPÍTULO II

INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD

2.1 Institución Donde se Desarrolló la Actividad

Las actividades vistas en el presente trabajo se realizaron en la empresa COMBA TELECOM, en el área de ingeniería de radiofrecuencia, en la búsqueda de desarrollar una alternativa de solución tecnológica para presentar a las empresas interesadas.

2.2 Periodo de Duración de la Actividad

El periodo de duración de la actividad es de 3 meses. Este periodo comprende las fases descritas en el subcapítulo “organización de la actividad”.

2.3 Finalidad y Objetivos de la Entidad

COMBA TELECOM es una empresa multinacional cuya finalidad es impulsar el despliegue de las redes de telecomunicaciones para conectar al mundo, a través de sus diversos productos: antenas outdoor para telefonía celular, sistemas DAS activo para solución de cobertura celular en ambientes indoor, repetidores de RF (radio frecuencia), entre otras soluciones tecnológicas.

2.4 Razón social

La razón social de la institución donde se desarrolló la actividad es COMBA TELECOMUNICACIONES DEL PERÚ SAC.

2.5 Dirección Postal

La dirección postal de la institución donde se desarrolló la actividad es la siguiente: Calle German Schreiber Nro. 227 Dpto. 501, San Isidro - Lima – Lima.

2.6 Correo Electrónico del Profesional a Cargo

El profesional a cargo de realizar el seguimiento de la actividad es el gerente del área donde se desarrolló la actividad, y cuyo correo es el siguiente: juan.huaripata@comba-telecom.com.

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

3.1 Organización de la Actividad

La actividad a desarrollar comprende las siguientes fases:

- Analizar la problemática y definición de los problemas específicos a resolver mediante el sistema electrónico.
- Diseñar el sistema electrónico haciendo uso de la mejor tecnología LPWAN para este caso en particular.
- Armar el sistema diseñado.
- Probar el prototipo fabricado con distintos tests que modelen y comprueben el correcto desempeño del sistema en un ámbito real.
- Afinar algunos parámetros del sistema para obtener los resultados esperados.

3.2 Finalidad y Objetivos de la Actividad

En la presente sección se describen la finalidad y objetivos de la actividad.

3.2.1 Finalidad

La finalidad de la actividad es el desarrollo de un circuito electrónico que permita monitorear y controlar el flujo de agua remotamente, haciendo uso de la tecnología de red inalámbrica LoRa WAN, y que sirva como prototipo para la gestión de este recurso hídrico en una red de distribución de agua potable.

3.2.2 Objetivos

- Permitir la lectura del caudal y consumo de agua de forma remota y en tiempo real empleando la tecnología LoRa WAN como tecnología de comunicación inalámbrica.
- Controlar el paso y bloqueo del flujo de agua en determinado tramo de un circuito de agua y de forma totalmente remota.
- Recolectar y visualizar la información obtenida por los nodos LoRa WAN de manera gráfica para permitir el análisis y toma de decisiones a partir del histórico de datos.

3.3 Problemática

En la presente sección se describen la problemática que afronta el sector de servicios de agua potable y que se busca resolver con la presente investigación.

3.3.1 Problema General

Actualmente los servicios de agua y saneamiento en Perú son insostenibles, en gran parte debido al modelo de gestión de los operadores de estos servicios. Por lo que urge una mejora en la eficacia del manejo del recurso hídrico a nivel tecnológico.

3.3.2 Problemas Específicos

- Actualmente se registra gran cantidad de agua potable robada a través de conexiones clandestinas que son difíciles de detectar.
- Se registra gran cantidad de pérdidas de agua potable por filtraciones y rotura de tuberías en el sistema de distribución.

- La lectura de medidores de forma manual puede generar errores.
- Un porcentaje considerable de clientes del servicio de agua potable presenta sus reclamos frente a problemas operacionales por falta de agua.
- Se requiere mejorar urgentemente la eficiencia en la gestión del recurso hídrico, adoptando cambios tecnológicos.

3.3.3 Justificación e Importancia de la Investigación

Analizando el histórico de acontecimientos se puede obtener una radiografía de los obstáculos que ha enfrentado y que sigue enfrentando a día de hoy el sector de los servicios de agua y saneamiento en el Perú.

En declaraciones hechas por la empresa de servicio de agua potable y alcantarillado de Lima (SEDAPAL) en el 2016 al diario El Comercio se informó:

La cantidad de agua potable que fue robada a través de conexiones clandestinas en Lima y Callao en el 2016 pudo abastecer a 3 mil familias en esos doce meses (...) además, resaltó que es muy difícil detectar los enlaces de agua que están al margen de la ley porque son subterráneas. (Briceño, 2017)

Con objeto de medir la sostenibilidad ambiental de los servicios brindados por las empresas de agua se emplea el indicador de “agua no facturada (ANF)”, agua producida que no es facturada como resultado de pérdidas por filtraciones y rotura de caños, además de la existencia de medidores manuales que pueden generar errores. De acuerdo al reporte de Benchmarking de la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento, en el año 2018 la empresa SEDAPAL registra un valor de 27.8% en este indicador. (SUNASS, Benchmarking regulatorio 2020, 2020) La reducción del nivel del ANF es un objetivo del Plan Nacional de Saneamiento.

De acuerdo a los informes reportados por la SUNASS en el año 2020:

Un total de 15 572 usuarios del servicio de agua potable y alcantarillado de todo el país fueron atendidos por la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (Sunass), a través de sus canales de atención remota, durante los 100 días que lleva el estado de

emergencia a causa de la COVID-19. (...) En este periodo, el 47 % de las atenciones estuvo relacionada a consultas comerciales como problemas con la facturación (...) el 31 % de atenciones por los canales remotos de la Sunass estuvo relacionado con problemas operacionales por falta de agua, problemas con alcantarillado y aniegos por roturas de tuberías. (SUNASS, sunass.gob.pe, 2020)

El primer encuentro virtual “Aguas todas” reunió a más de 20 destacados profesionales, nacionales y extranjeros quienes hablaron sobre la importancia de que las empresas que brindan el servicio de agua potable pueden transformarse en “empresas del futuro” adoptando los cambios tecnológicos y de innovación requeridos para mejorar la eficiencia en la gestión del recurso hídrico. (Cestti, 2020) Este encuentro fue celebrado en Perú en el mes de julio del año 2020.

Como se puede inferir de lo expuesto hay una problemática en la eficiencia de la gestión del agua. No sólo intervienen aspectos de ingeniería si no también aspectos legales, económicos, ambientales y sociales. Habiendo identificado este problema, el presente trabajo busca resolver el aspecto de ingeniería y responder la siguiente pregunta: ¿En qué medida el desarrollo de un sistema electrónico de bajo costo para monitorear y controlar el flujo de agua basado en la tecnología LORA permite aumentar la eficiencia y mejorara la calidad del servicio de agua potable?

3.4 Metodología

En la presente sección se describen la problemática que afronta el sector de servicios de agua potable y que se busca resolver con la presente investigación.

3.4.1 Bases Teóricas

En la actualidad son muchos los países que apuestan por el uso de las nuevas tecnologías de la cuarta revolución industrial, tales como el Internet de las

Cosas (IoT) y Big Data, para una amplia gama de industrias incluyendo la gestión del agua.

Por ejemplo, la empresa brasileña GHydro ofrece servicios de gestión del agua, monitoreo de pozos artesianos y telemetría de líquidos. (GHIDRO, 2020) Esta compañía opera en el terreno del hardware mediante la provisión de sensores compactos que se comunican mediante la tecnología GPRS.

En tanto el gobierno de Chile se ha asociado a la firma española de telecomunicaciones Telefónica, a la empresa de tecnología IoT Huawei y a la empresa de medidores inteligentes Kamstrup para llevar a cabo un proyecto piloto usando la tecnología NarrowBand IoT (NB-IoT) a fin de realizar la telemedición de contadores residenciales de agua. (Telefónica, 2017)

3.4.2 Marco Conceptual

3.4.2.1 Internet de las Cosas. La cuarta revolución industrial viene de la mano de los avances en el campo de la Comunicación y la Información. Como parte de esta revolución el Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) es una de las tecnologías más innovadoras y versátiles capaz de adaptarse a una infinidad de procesos industriales.

Imagine un mundo donde casi cualquier cosa que se le ocurra se encuentra en línea y comunicándose con otras cosas y personas para permitir que nuevos servicios mejoren nuestras vidas. Desde drones autónomos que entregan su pedido de comestibles hasta sensores en su ropa que monitorean su salud, el mundo conocido está listo para experimentar un importante cambio tecnológico hacia el futuro gracias al IoT.

La premisa básica y el objetivo de IoT es conectar cada objeto que actualmente no está unido a una red de comunicaciones, es decir Internet, para que puedan comunicarse e interactuar con personas y otros objetos. Esta transición tecnológica permitirá detectar y controlar el mundo físico al hacer que los objetos sean más inteligentes y conectarlos a través de una red inteligente.

Es innegable el impacto que Internet ya ha tenido en los sectores de la educación, comunicación, negocios, ciencia, gobierno y más. La tecnología

de IoT es considerada como la próxima evolución de Internet, dando un gran salto en su capacidad de recopilar, analizar y distribuir datos que se pueden convertir en información y conocimiento.

El número de los dispositivos IoT han aumentado notablemente en los últimos años y continuará expandiéndose rápidamente. De acuerdo al reporte emitido por el equipo de expertos en investigación “Strategy Analytics” y como muestra la figura 1, el número de dispositivos IoT conectados a fines del año 2018 alcanzó la cifra de 22 billones, siendo en el sector industrial donde se usa cerca del 50% de estos equipos, y estamos en camino de alcanzar un aproximado de 40 billones de dispositivos IoT en uso alrededor del mundo para el año 2025. (Strategy Analytics, 2019)

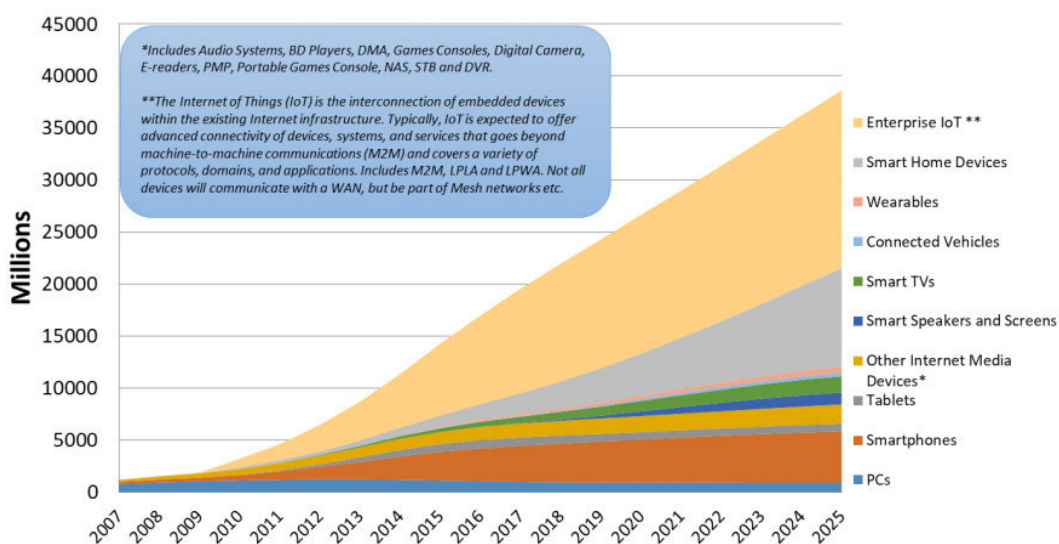


Figura 1: Pronóstico del número de dispositivos IoT. Fuente: (Mercer, 2019)

Lo que significan estos números es que IoT cambiará la forma en que las personas y las empresas interactúan con su entorno. Administrar y monitorear objetos inteligentes utilizando conectividad en tiempo real permite un nivel completamente nuevo de toma de decisiones basada en datos. Esto a su vez da como resultado la optimización de sistemas y procesos y ofrece nuevos servicios que ahorran tiempo tanto para las personas como para las empresas al tiempo que mejoran la calidad de vida en general.

3.4.2.2 Redes IoT inalámbricas. El internet de las cosas es una interconexión de los diversos dispositivos IoT con la infraestructura de internet existente a través de diversas redes y protocolos. Hoy en día existe una amplia gama de redes para conectar dispositivos, a continuación, se describen los estándares de redes más comunes que se utilizan en la actualidad.

3.4.2.3 Wi-Fi. El Wi-Fi es sin duda la tecnología inalámbrica implementada con mayor éxito. Este estándar es una tecnología clave de acceso inalámbrico de IoT, ya sea para conectar puntos finales como nodos de computación de niebla, sensores de alta velocidad de datos y dispositivos de análisis de audio o video o para implementar infraestructuras de backhaul de Wi-Fi, como una malla de Wi-Fi exterior en ciudades inteligentes, petróleo y minería u otros entornos. Sin embargo, Wi-Fi no opera en bandas sub-GHz para una mejor penetración de la señal, no soporta baja potencia para los nodos que funcionan con batería y la capacidad de admitir una gran cantidad de dispositivos. (Salgueiro, Barton, & Hanes, 2017)

En la tabla 1 se resumen las principales características técnicas de la tecnología WiFi, considerando los estándares IEEE 802.11 a/g/n.

Tabla 1: Características técnicas de la tecnología WiFi

Característica técnica	Tecnología WiFi
Estándar	IEEE 802.11
Banda de frecuencia	No licenciada: 2.4 GHz / 5 GHz
Ancho de Banda	23MHz (a/g) / 40MHz (n)
Velocidad de transmisión máx.	~ 54Mbps (a/g) / ~ 600Mbps (n)
Rango de cobertura	≤ 100 mts
Penetración	Baja. Ideal para interiores
Consumo de potencia	Bajo consumo

Hay muchos dispositivos con capacidad Wi-Fi disponibles en el mercado. Los módulos Wi-Fi son relativamente baratos y generalmente son buenas

opciones para cuando es posible o deseable usar una red disponible y admitir transferencias de alta carga útil, dada su confiabilidad y velocidad de conexión.

La arquitectura de IoT basada en Wi-Fi se ilustra en la figura 2. Múltiples dispositivos pueden conectarse a un nodo, como un router, que a su vez se conecta a Internet y permite que los dispositivos conectados accedan a Internet.

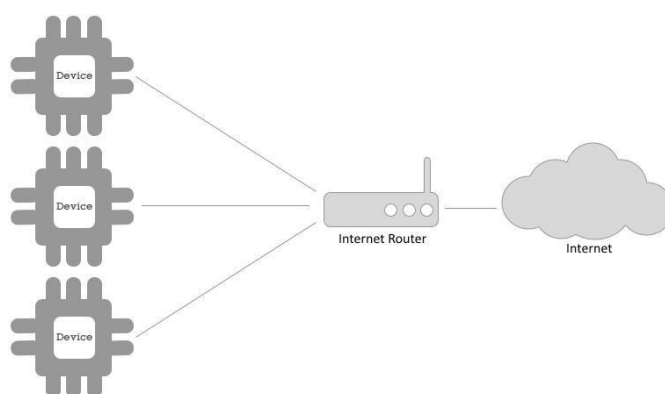


Figura 2: Arquitectura IoT basado en WiFi. Fuente: (Moura, 2019)

3.4.2.4 Bluetooth Low Energy. La tecnología Bluetooth también es muy conocida debido a que se utiliza en una gran cantidad de dispositivos como teléfonos, audífonos o cámaras. Pero si se utiliza Bluetooth para IoT se debe hablar de la versión BLE (Bluetooth Low Energy). BLE es una especificación dirigida principalmente a aplicaciones de IoT a pequeña escala, como dispositivos portátiles, que requieren que los dispositivos envíen pequeñas cantidades de datos con un consumo mínimo de energía. (IOTFORALL, 2020) BLE provee tasas de transferencia de datos de poco menos de 1 Mbps, opera en la banda no licenciada de 2.4GHz, lo que lo hace ideal para su uso en interiores y a distancias cortas, y permite el uso de un número ilimitado de nodos a diferencia del Bluetooth tradicional. Estas y otras especificaciones son listadas en la Tabla 2.

Tabla 2: Características técnicas de la tecnología BLE

Característica técnica	Tecnología BLE
Estándar	IEEE 802.15.1
Banda de frecuencia	No licenciada: 2.4 GHz
Ancho de Banda	2 MHz
Velocidad de transmisión máx.	~ 1Mbps
Rango de cobertura	≤ 100 mts
Penetración	Baja. Ideal para interiores
Consumo de potencia	Bajo consumo

Hay una serie de buenos ejemplos en los que ya se está utilizando Bluetooth de baja energía: monitores de frecuencia cardíaca, aplicaciones de salud, monitor de batería, las aplicaciones de bloqueo del automóvil, relojes inteligentes y dispositivos portátiles; todos utilizan una o más características del BLE.



Figura 3: **Arquitectura BLE.** Fuente: (Wedd, 2020)

Tal como ilustra la figura 3, existen tres tipos de arquitectura de red para BLE:

- Punto a punto: Como medio para emparejar dos dispositivos.
- Estrella: Un dispositivo central transmite información a muchos dispositivos. Cada dispositivo periférico se comunica indirectamente por el nodo central.
- Malla: Una forma de conectar un dispositivo a uno o más dispositivos, donde se establece nodos finales, nodos enrutadores y nodo coordinador.

3.4.2.5 ZigBee. ZigBee es la tecnología basada en el estándar IEEE 802.15.4 enfocado en redes de área personal inalámbricas que tienen un ancho de banda bajo y bajo consumo de energía. Las características de la tecnología ZigBee se consolidan en la Tabla 3.

Tabla 3: Características técnicas de la tecnología ZigBee

Característica técnica	Tecnología ZigBee
Estándar	IEEE 802.15.4
Banda de frecuencia	No licenciada: 2.4 GHz
Ancho de Banda	16 canales de 5MHz
Velocidad de transmisión máx.	~ 250Kbps
Rango de cobertura	≤ 100 mts
Penetración	Baja. Ideal para interiores
Consumo de potencia	Bajo consumo

Las áreas principales en las que ZigBee es más conocido incluyen la automatización para aplicaciones comerciales, minoristas y domésticas y la energía inteligente. En el espacio de automatización industrial y comercial, los dispositivos basados en ZigBee pueden manejar varias funciones, desde medir la temperatura y la humedad hasta rastrear activos. (Salgueiro, Barton, & Hanes, 2017)

La estructura del sistema Zigbee consta de tres tipos diferentes de dispositivos: el coordinador Zigbee, el enrutador y el dispositivo final. Cada red debe constar de al menos un coordinador que actúa como raíz y puente de la red. El coordinador es responsable de manejar y almacenar la información mientras realiza las operaciones de recepción y transmisión de datos. Los enrutadores Zigbee actúan como dispositivos intermediarios que permiten que los datos pasen de un lado a otro a otros dispositivos. Ver figura 4.

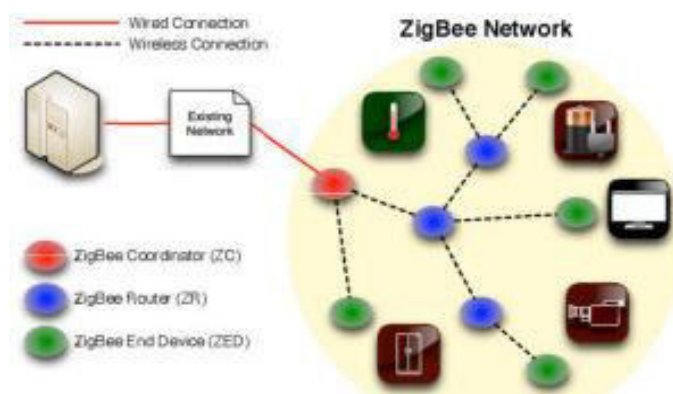


Figura 4: **Arquitectura ZigBee.** Fuente: (IOTFORALL, 2020)

3.4.2.6 Redes LPWAN. Como parte de la familia de las redes de área amplia (WAN, por sus siglas en inglés) se encuentran las LPWAN, un tipo de red inalámbrica de área diseñada para permitir comunicaciones de largo alcance a una velocidad de bits baja entre objetos conectados y con un mínimo consumo de potencia, lo que lo hace un tipo de red muy usada por los dispositivos IoT en la actualidad. La figura 5 muestra un panorama de cómo viene siendo usada esta tecnología expresada en el número de dispositivos IoT conectados mediante LPWAN, y el pronóstico esperado para los siguientes años.

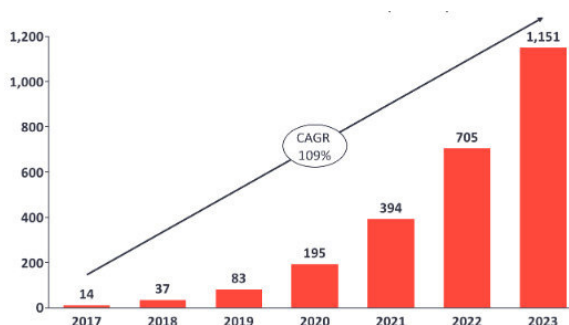


Figura 5: **Número de dispositivos IoT LPWAN.** Fuente: (Pasqua, 2018)

Los diferentes productos que implementan LPWAN trabajan en la banda ISM, la cual representa un espectro que internacionalmente se reserva al uso no comercial asociado con la industria, la ciencia y los servicios médicos. Las ISM usualmente abarcan rangos de baja frecuencia que permite que la red

sea muy confiable y robusta frente a la interferencia, incluso cuando se propagan mensajes para rangos muy grandes. Además, permite el uso de baterías de larga duración y dispositivos más pequeños.

Las LPWAN se basan en una serie de tecnologías diferenciadas, por una parte, las que ofrecen el servicio en espectro licenciado y de uso exclusivo, como son NB-IoT y LTE-M, y, por otra, aquellas que lo hacen dentro del espectro no licenciado, como son Sigfox y LoRaWAN.

3.4.2.7 NB-IoT. La tecnología NB-IoT está siendo impulsada por el 3GPP, los principales operadores móviles y los grandes fabricantes como Huawei, Ericsson o Nokia a fin de dar respuesta a la necesidad de comunicación IoT. NB-IoT usa las bandas celulares de comunicación y se ha diseñado para operar usando la banda de LTE y por lo tanto compartiéndola o incluso utilizando el espaciado que hay entre los canales LTE, las bandas de guarda, para aprovechar al máximo el espectro de comunicaciones. En este sentido, NB-IoT nace condicionado por la arquitectura LTE y debe coexistir con esta tecnología sin introducir modificaciones a la estructura y arquitectura de la red celular. Esto implica una complejidad mucho más elevada que sus competidoras LPWAN. Estas y otras especificaciones se describen en la Tabla 4.

Tabla 4: Características técnicas de la tecnología NB-IoT

Característica técnica	Tecnología NB-IoT
Estándar	3GPP Release 13, NB-IoT
Banda de frecuencia	Licenciada: dentro de la banda LTE o en las bandas de guarda LTE
Ancho de Banda	200 KHz
Velocidad de transmisión máx.	~ 200Kbps
Rango de cobertura	≤ 25 kms
Penetración	Alta-Baja según frecuencia
Consumo de potencia	Muy bajo consumo

La arquitectura básica para NB-LTE se muestra en la figura 6 y, similar a la red LTE, consta de dos partes: la red de acceso y la red core EPS. En la arquitectura de la red de acceso no hay cambios, pero en la red Core, tanto en el plano de usuario como en el plano de control, se realizan algunas otras optimizaciones para admitir la aplicación IoT. Se ha introducido un nuevo nodo como SCEF (Función de exposición de capacidad de servicio). El SCEF está diseñado especialmente para datos de tipo de máquina. Se utiliza para la entrega de datos no IP sobre el plano de control y proporciona una interfaz para los servicios de red (autenticación y autorización, descubrimiento y capacidades de red de acceso).

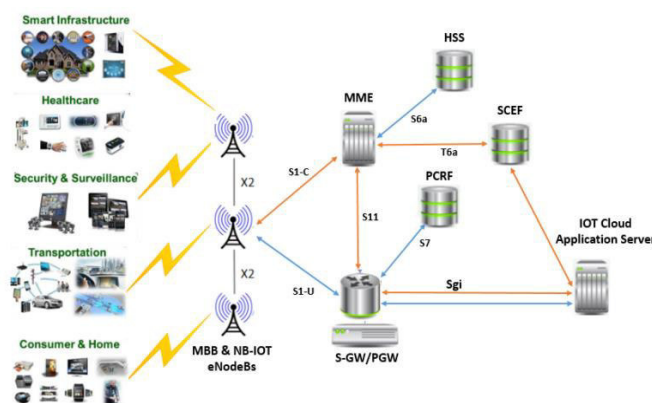


Figura 6: **Arquitectura NB-IoT.** Fuente: (Malik, 2016)

Entre los usos que ha recibido la tecnología NB-IoT, se pueden destacar los aparcamientos inteligentes y los contadores de gas inteligentes. Una experiencia del primer caso se ha llevado a cabo en China y consiste en un sistema de aparcamiento de vehículos.

3.4.2.8 SigFox. SigFox es otra tecnología de tipo LPWAN que permite la comunicación a gran distancia de datos ligeros con bajo consumo de energía. SigFox utiliza tecnología patentada que tiene una tasa de modulación lenta para lograr un rango más extendido. Debido a esta elección de diseño, SigFox es una excelente opción para aplicaciones en las que el sistema solo necesita

enviar ráfagas de datos pequeñas y poco frecuentes. Estas y otras características se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5: Características técnicas de la tecnología SigFox

Característica técnica	Tecnología SigFox
Estándar	SigFox
Banda de frecuencia	No licenciada: 868/902 MHz
Ancho de Banda	100 Hz
Velocidad de transmisión máx.	100bps
Rango de cobertura	≤ 50 kms
Penetración	Alta penetración
Consumo de potencia	Muy bajo consumo

Entre los proyectos emprendidos con la tecnología Sigfox se puede mencionar la monitorización de objetos, por ejemplo, el equipaje mientras se viaja o la mochila de los escolares cuando vuelven del colegio. También hay proyectos relacionados con la agricultura inteligente, como el llevado a cabo por Thinxtra en Nueva Zelanda, en donde mejora la productividad agrícola y ganadera. (Fundación Telefónica, 2019)

La red SigFox utiliza la topología en estrella como se aprecia en la figura 7.

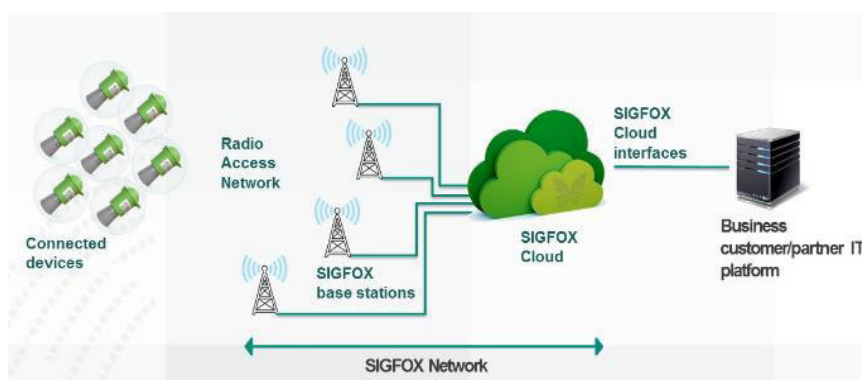


Figura 7: Arquitectura SigFox. Fuente: (Sigfoxs Support, 2020)

3.4.2.9 LoRaWAN. LoRa es una tecnología inalámbrica para redes de área amplia de baja potencia (LPWAN). El nombre, LoRa, es una referencia a los enlaces de datos de largo alcance que permite esta tecnología. LoRa proporciona comunicaciones de largo alcance: hasta cinco kilómetros en áreas urbanas y hasta 15 kilómetros o más en áreas rurales, con línea de vista. Una característica clave de las soluciones basadas en LoRa son los requisitos de energía ultra bajos, lo que permite la creación de dispositivos que funcionan con baterías que pueden durar hasta 10 años. Es perfecta para aplicaciones que requieren una comunicación de largo alcance y bajos requisitos de energía. (Semtech, 2020) Las especificaciones de esta tecnología se resumen en la tabla 6.

Tabla 6: Características técnicas de la tecnología LoRaWAN

Característica técnica	Tecnología LoRaWAN
Estándar	LoRaWAN
Banda de frecuencia	No licenciada: 433/868/915 MHz
Ancho de Banda	125KHz/500KHz
Velocidad de transmisión máx.	250bps - 50kbps
Rango de cobertura	≤ 15 kms
Penetración	Alta penetración
Consumo de potencia	Muy bajo consumo

En una red LoRaWAN como se muestra en la figura 8, los nodos no están asociados con un gateway en específico, sino que los datos transmitidos por un nodo son recibidos típicamente por múltiples gateways. Cada gateway reenviará el paquete recibido desde el nodo final a la nube servidor de red a través de backhaul (ya sea celular, Ethernet, satélite o Wi-Fi). El servidor de red es el encargado de la inteligencia y la complejidad del sistema: gestiona la red y filtra los paquetes recibidos redundantes, realiza controles de seguridad, programa reconocimientos a través del gateway más óptimo y modula la velocidad de transmisión de datos, etc. (LORA ALLIANCE, 2015)

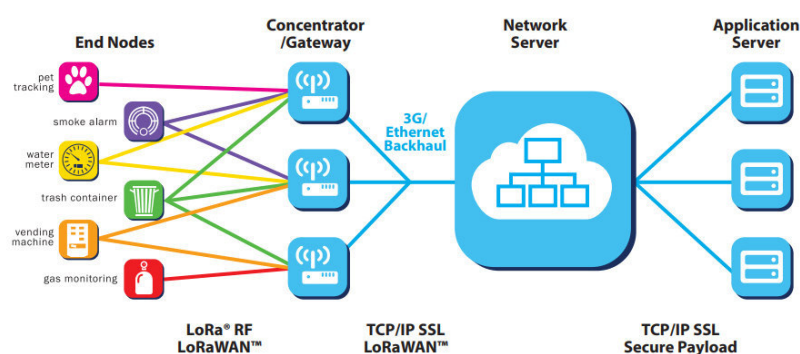


Figura 8: **Arquitectura LoRaWAN.** Fuente: (LORA ALLIANCE, 2015)

3.4.2.10 Sensores IoT. IoT se apoya en un montón de “cosas” que recopilan datos mediante sensores y se conectan para enviar esa información a algún repositorio desde el que serán utilizados para diversas aplicaciones. Los sensores se usan en prácticamente todas las aplicaciones de IoT, el único requerimiento es analizar qué clase de información se necesita recolectar, la figura 9 recoge algunos de los tipos más.

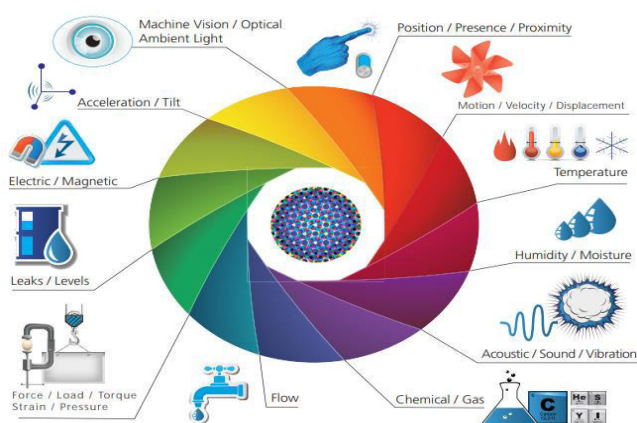


Figura 9: **Abanico de sensores IoT.** Fuente: (HARBOR RESEARCH, 2015)

Básicamente, estos pequeños detectores hacen que los dispositivos sean capaces de sentir, como si gracias a ellos fueran un poquito más humanos. Cuando alguien toca un metal ardiendo, por ejemplo, el sentido del tacto envía un estímulo al cerebro para que podamos crearnos una impresión consciente del mundo físico. Lo mismo sucede con los dispositivos IoT: los sensores

recogen los datos del ambiente y los envía al cloud para transformar la información captada en la vida real en algo digital. Los sensores actúan como el sistema nervioso, recogiendo los datos que se han de procesar, y el cloud (software) hace de cerebro. (ACCENT-SYSTEMS, 2018)

3.4.2.11 Servidores IoT en la nube. Ante la gran cantidad de datos procedentes de las distintas aplicaciones IoT, se suscita una preocupación, cómo procesar todos estos datos. La primera solución es disponer de servidores físicos capaces de procesar esa enorme cantidad de datos procedentes de los sensores y dispositivos conectados. Tener esta infraestructura in-house tiene implicaciones a nivel de costes, mantenimiento, seguridad y durabilidad. Por fortuna, la nube es la solución que puede reducir el impacto en las cuentas de la empresa.

La nube permite a los dispositivos de IoT almacenar los datos que generan sin tener que utilizar espacio en servidores físicos. Al ser una estructura distribuida y no dependiente de una única organización, con gran redundancia y sistemas de seguridad eficaces y con ventajas para los negocios, la nube facilita la adopción del IoT. (ARSYS, 2019)

Un servidor IoT en la nube facilita la comunicación, el flujo de la información, la administración de dispositivos y la funcionalidad de las aplicaciones. Si se toman en consideración los distintos tipos de hardware disponibles, tanto de conectividad como sensores, se vuelve indispensable una herramienta que permita realizar cambios, escalar la operación y responder a incidentes de forma centralizada: ese es el rol que intentan cumplir estas plataformas.

3.5 Procedimiento

Para el proyecto a desarrollar será necesario el uso de sensores de caudal, a fin de poder medir el caudal que está pasando por el sistema, y electroválvulas, para controlar el paso y bloqueo de determinado circuito de agua. En el mercado hay una variedad de modelos de caudalímetros y electroválvulas según el caso de uso, existen dispositivos según el fluido de

trabajo (agua, combustibles, aceites) y modelos de mayor o menor precisión, y a un precio bastante asequible.

Los datos obtenidos por los sensores serán manejados por los nodos de la solución, los cuales operan en base a microcontroladores. Existe una amplia gama de modelos de microcontroladores en el mercado de acuerdo a cada caso de uso. Existen también placas de circuito impreso Arduino que cuentan con un microcontrolador y sus componentes periféricos necesarios que son muy adecuadas para diversas aplicaciones.

Por otro lado, para escoger el modo de conectividad de los nodos de la solución plantada, y por tanto su arquitectura, se debe identificar la tecnología más adecuada que cumpla con las particularidades de la solución IoT planteada.

Una tecnología no puede servir a todas las aplicaciones en el mundo del IoT, cada tecnología tiene su propio campo de aplicación en el cual goza de una variedad de ventajas a la vez que en otro campo sufre desventajas considerables.

La figura 10 muestra un panorama general de las tecnologías inalámbricas más comunes haciendo una comparación en el rango de cobertura, ancho de banda y coste promedio de implementación, característicos de cada una de estas tecnologías.

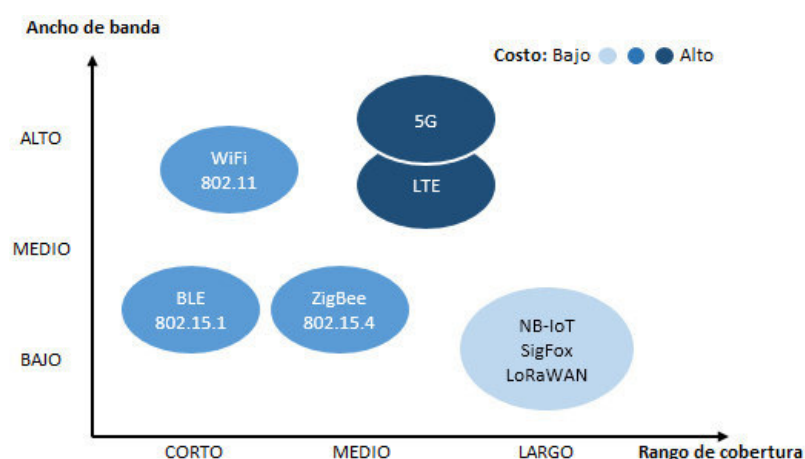


Figura 10: Comparación de tecnologías inalámbricas.

El rol de WiFi en el IoT es importante y no debe ser subestimado, pero el enfoque de WiFi es adecuado para las aplicaciones IoT que requieren de un gran ancho de banda y baja latencia. Las redes IoT basadas en BLE y ZigBee son muy efectivas para aplicaciones en interiores, pero al operar en banda de 2.4GHz no tiene una buena penetración en paredes y demás obstáculos y su rango de cobertura al igual que en WiFi es muy limitado, lo que las vuelve una mala elección para escenarios exteriores. Por su parte las redes de telefonía móvil GPRS, 3G y LTE son la alternativa ideal para soluciones que requieran de gran ancho de banda y un rango de cobertura considerablemente bueno, pero el coste para atender lugares donde se necesita nueva infraestructura sumado al coste de los planes de datos por cada dispositivo lo hace una solución costosa. Por otro lado, las redes LPWAN brindan una alternativa que abarca un gran rango de cobertura, bajo consumo de potencia y a un bajo coste.

A fin de hallar la tecnología más adecuada, los criterios que debe abordar son:

- Rango de cobertura amplia: la mínima cantidad de gateways debe cubrir áreas extensas, ya que la red de monitoreo de agua tendría que abarcar gran territorio.
- Ancho de banda corto y velocidad de transmisión baja: se requiere transmitir datos de monitoreo que por lo general ocupan paquetes pequeños de datos.
- Consumo de potencia ultra baja: cada dispositivo final debe poder ser alimentado por una batería de modo que tenga varios años de autonomía.
- Penetración frente a obstáculos alta: ya que se proyecta el uso de esta red en zonas urbanas donde el sistema de agua y saneamiento ya está instalado.
- Coste bajo: puede haber muchas tecnologías que sirvan para atender el propósito planteado, pero se requiere una solución de costo-efectiva.

La tabla 7 hace un resumen de las características requeridas según los objetivos del proyecto y las características ofrecidas por cada una de las tecnologías inalámbricas. Se observa que las LPWAN se ajustan más a los requerimientos del proyecto.

Tabla 7: Capacidades de las tecnologías inalámbricas

Característica técnica	Velocidad	Cobertura	Penetración	Consumo potencia
Requerimiento	BAJA	AMPLIA	AMPLIA	ULTRA BAJA
WiFi	Alta	Baja	Baja	Baja
BLE	Baja	Baja	Baja	Ultra baja
ZigBee	Baja	Baja	Baja	Baja
NB-IoT	Baja	Amplia	Amplia	Ultra baja
SigFox	Muy Baja	Amplia	Amplia	Ultra baja
LoRaWAN	Baja	Amplia	Amplia	Ultra baja

Por último, será igualmente necesario una plataforma que gerencia todos los datos obtenidos a través de los nodos del sistema. Para ello se explorarán las plataformas IoT alojadas en la nube.

Hay variedad de plataformas IoT a disponibilidad actualmente que ofrecen buenas características de almacenamiento y visualización de datos, y permiten contar con el sistema necesario para una solución IoT punto a punto. The Things Network (TTN) ha calado grandemente en la comunidad IoT global. En este momento disponen de 2946 Gateways en todo el mundo gracias a comunidades locales que montan estos puntos de acceso extendiendo la red IoT. Esta creciente comunidad está acelerando la expansión del IoT, facilitando a muchas personas el acceso sencillo y gratuito a un ecosistema de IoT donde pueden hacer realidad sus proyectos de forma muy sencilla a través de esta plataforma.

La plataforma ThingSpeak cuenta con el soporte de Matlab para el análisis y procesamiento de datos. Además de contar con otras particularidades como son: la programación de eventos, de análisis de datos, la ejecución automática de acciones, etc. Esta plataforma también es compatible con varios dispositivos, como Arduino, Raspberry Pi, ESP, Particle, etc.

3.6 Resultados de la Actividad

En las secciones previas se realizó un estudio conceptual de los elementos que conforman una red IoT: sensores, microcontroladores, tecnologías de comunicación inalámbrica y servidores IoT en la nube.

La elección de la red IoT que se plantee como solución propuesta debe cumplir con los objetivos muy particulares del proyecto, siendo lo más relevante definir la tecnología de transmisión inalámbrica que requiere el proyecto, ya que los dispositivos sensores y actuadores, y la plataforma IoT en la nube son genéricas y operarán correctamente con cualquier medio de transmisión.

Se define que para este caso es más conveniente usar la tecnología LPWAN, y particularmente LoRaWAN debido a que atiende los requerimientos específicos de la solución planeada:

- Rango de cobertura amplia: ofrece cobertura de largo alcance haciendo uso de una cantidad mínima de gateways, ya que la red de monitoreo de agua tendría que abarcar grandes áreas pobladas.
- Penetración frente a obstáculos alta: capaz de sortear distintos obstáculos en un entorno tanto urbano como rural, ya que se proyecta el uso del sistema en zonas donde el sistema de agua y saneamiento ya esté instalado.
- Consumo de potencia ultra baja: haciendo que el sistema sea totalmente independiente de un servicio de energía eléctrica, cada dispositivo final será alimentado por una batería de bajo voltaje y tendrá varios años de autonomía.
- Velocidad de transmisión baja: más que una ventaja, se aprecia que esta es una característica por contraste a las otras alternativas de transmisión ya que el presente proyecto requiere transmitir datos de monitoreo que por lo general ocupan paquetes pequeños de datos, no necesitando sobrecargar la red.
- Coste bajo: puede haber muchas tecnologías que sirvan para atender el propósito del proyecto, pero se requiere una solución de bajo coste tal como lo ofrece la tecnología LoRaWAN.

CAPÍTULO IV CONCLUSIONES

4.1 Justificación

Habiendo definido la tecnología de transmisión inalámbrica a usar, LoRaWAN, se define la arquitectura correspondiente para la red de monitoreo y control de agua, como se ilustra en la figura 11.

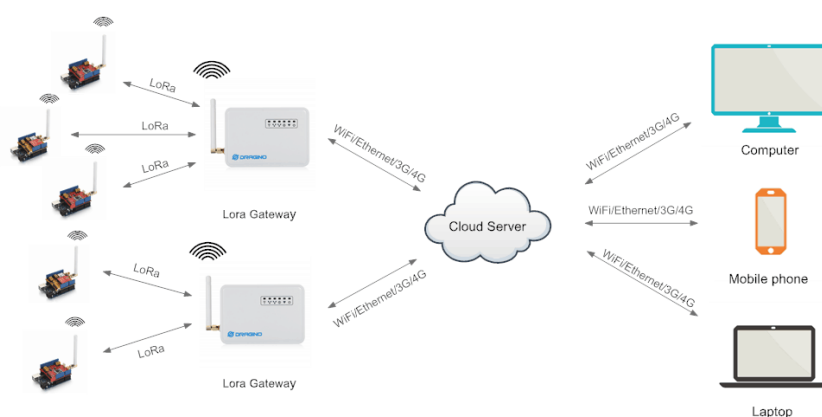


Figura 11: Arquitectura de red LoRa. Fuente: (ELEKTOR, 2020)

Se proyecta el uso de dos tipos de nodos: el “nodo usuario final” que se ubicaría en la residencia de cada cliente del servicio de agua para realizar la medición de caudal y consumo, y el “nodo administrativo” cuyo fin es el de controlar el flujo de agua: siendo posible conceder el paso de agua o bloquearla, además de monitorear el flujo de agua.

Cada nodo de usuario final contará con un caudalímetro YF-S201, que internamente tiene un rotor que con el flujo del agua genera una señal en forma de pulsos que será enviada al microcontrolador alojado en la placa Arduino Uno, éste seguirá sus instrucciones configuradas para mediante

diversos cálculos obtener los valores del caudal y consumo de agua y enviará estos datos al módulo Dragino LoRa Shield para que la información viaje a través de la tecnología de largo alcance LoRa hasta el gateway de la red. El nodo de usuario final es alimentado por una batería de 6V.

El diagrama de bloques del nodo de usuario final se muestra en la figura 12.

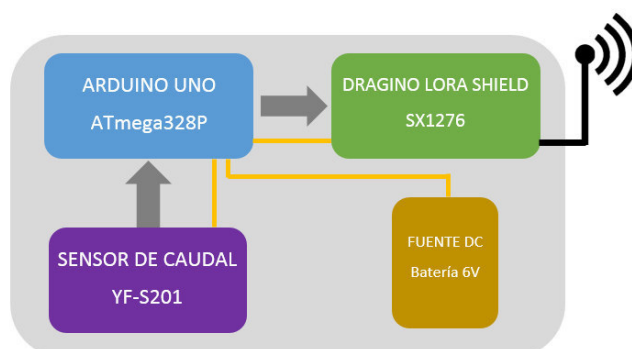


Figura 12: Diagrama de bloques del nodo usuario final.

El nodo administrativo tendrá mucha similitud con el anteriormente descrito salvo que a este nuevo nodo se le añade la electroválvula para que la empresa de distribución de agua potable tenga total control sobre el estado del paso del agua sobre ciertos tramos de la red y de manera totalmente remota. En este caso la comunicación a través de la tecnología LoRa será bidireccional y se requerirá una fuente de 12V para la alimentación de la electroválvula, esto adicional a la batería de 6V que alimenta el resto de la circuitería. El diagrama de bloques del nodo administrativo se muestra en la figura 13.

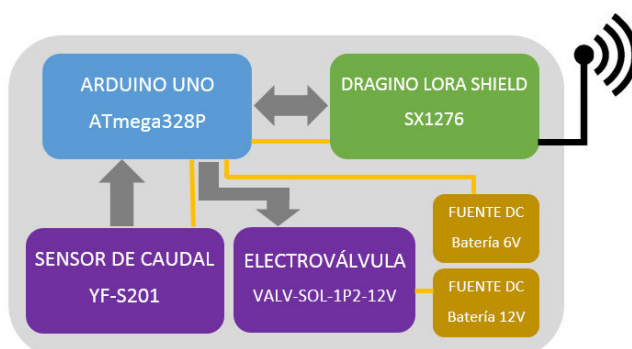


Figura 13: Diagrama de bloques del nodo administrativo.

4.2 Metodología Aplicada

Una vez que se tiene el proyecto formalmente planteado, es necesario hacer una evaluación técnica y económica de la solución de monitoreo y control remoto de una red de distribución de agua potable.

4.2.1 Evaluación Económica

El propósito de esta sección es mostrar el presupuesto preliminar del costo de los elementos que conforman el sistema a desarrollar. Se pretende que la información mostrada muestre un panorama de lo que podría implicar la cantidad de inversión a considerar, cubriendo el costo de los elementos más importantes del sistema electrónico para el monitoreo y control remoto de una red de distribución de agua potable, aunque han de existir otros gastos adicionales que no se han de considerar en el presente documento, tales como la adecuación de la red de distribución de agua para integrar los nodos electrónicos que forman parte del sistema de solución. En la tabla 8 se detalla la lista de elementos que conforman el “nodo de usuario final” del sistema con sus respectivos precios.

Tabla 8: Cotización del nodo final para monitoreo de caudal

Cantidad	Unidad	Concepto	Precio Unit.	Importe
1	Ud.	Sensor de flujo de agua 1/2" YF-S201	20.00	20.00
1	Ud.	Arduino Uno (Original)	100.00	100.00
1	Ud.	Pilas Duracell 2A (paquete de 4 uds.)	13.00	13.00
1	Ud.	Dragino LoRa Shield SX1276	96.50	96.50
			Total	229.50

Cabe señalar que, aunque en el mercado se pueden encontrar los mismos elementos a un precio más económico, para este proyecto se están usando todos los elementos que son de marcas originales.

En la tabla 9 se detalla la lista de elementos que conforman el “nodo administrativo” del sistema con sus respectivos precios. En este caso este nodo considera el uso del controlador (electroválvula) y el sensor (caudalímetro), es decir, este nodo a diferencia del “nodo de usuario final” no solo será capaz de monitorear el flujo de agua sino también de controlar el paso/bloqueo del mismo.

Tabla 9: Cotización del nodo administrativo para monitoreo y control de caudal

Cantidad	Unidad	Concepto	Precio Unit.	Importe
1	Ud.	Sensor de flujo de agua 1/2" YF-S201	20.00	20.00
1	Ud.	Electroválvula soleonide de agua 1/2" 12Vdc	35.00	35.00
1	Ud.	Arduino Uno (Original)	100.00	100.00
1	Ud.	Pilas Duracell 2A (paquete de 4 uds.)	13.00	13.00
1	Ud.	Dragino LoRa Shield SX1276	96.50	96.50
			Total	264.50

Se considera también el uso de un nodo receptor de la información obtenida por los nodos con sensores asociados, éste hará la vez de enrutador de toda la data obtenida para transmitirla vía wifi hacía el servidor IoT en la nube.

La tabla 10 se detalla la lista de elementos que conforman el “nodo receptor”.

Tabla 10: Cotización del nodo receptor

Cantidad	Unidad	Concepto	Precio Unit.	Importe
1	Ud.	Arduino Uno (Original)	100.00	100.00
1	Ud.	Módulo Wi-Fi ESP8266	20.00	20.00
1	Ud.	Pilas Duracell 2A (paquete de 4 uds.)	13.00	13.00
1	Ud.	Dragino LoRa Shield SX1276	96.50	96.50
			Total	229.50

Las tablas mostradas anteriormente son referenciales en cuanto consideran el costo total por un solo nodo. Para una implementación a gran escala de la solución sobre un sistema de distribución de agua potable, se requiere calcular el número total de nodos necesarios.

4.2.2 Evaluación Técnica

4.2.2.1 Evaluación Técnica de los sensores. Para el proyecto a desarrollar será necesario el uso de sensores de caudal a fin de poder medir el caudal que está pasando por el sistema. En el mercado hay una variedad de diferentes tipos de caudalímetros según el caso de uso, existen caudalímetros que sirven para medir distintos fluidos (agua, combustibles, aceites) y distintos volúmenes con mayor o menor precisión, y a un precio bastante asequible. En la tabla 11 se hace una breve comparativa de los 4 sensores de caudal más utilizados

Tabla 11: Comparación de sensores de caudal.

	YF-S401	YF-S201	FS300A	FS400A
Sensor				
Conexión	1/4"	1/2"	3/4"	1"
Caudal	0.3 a 6 L/Min	1 a 30 L/Min	1 a 60 L/Min	1 a 60 L/Min
Presión (Máx)	0.8 MPa	1.75 MPa	1.2 MPa	1.2 MPa
Voltaje	DC 5~18 V	DC 5~18 V	DC 5~18 V	DC 5~18 V
Temperatura del líquido	$\leq 80^{\circ}\text{C}$	$\leq 80^{\circ}\text{C}$	$\leq 80^{\circ}\text{C}$	$\leq 80^{\circ}\text{C}$

La mayor diferencia entre ellos es el tamaño de las roscas de conexión, la presión máxima soportada y el caudal que miden, pero todos funcionan de similar modo: el agua circula a través del cuerpo del medidor de flujo haciendo girar la turbina que tiene dentro. Cuanto más flujo haya más rápido girarán las aspas de la turbina. Un imán situado en la turbina genera un pulso positivo cada vez que pasa por el sensor de efecto Hall. De esta forma se puede conocer las RPM que genera la hélice y calcular el caudal de agua con una sencilla ecuación.

4.2.2.2 Evaluación Técnica del microcontrolador. Existe una amplia gama de modelos de microcontroladores en el mercado de acuerdo a cada caso de uso. La tabla 12 muestra una comparativa general de los modelos de placas Arduino.

Tabla 12: Comparación de modelos de placas Arduino

Model	Arduino UNO	Arduino Mega 2560	Arduino DUE
Microcontroller	ATmega328	ATmega2560	AT91SAM3X8E
Operating Voltage	5V	5V	3.3V
Digital I/O Pins	14	54	54
Digital I/O Pins PWM	6	15	12
Analog Input Pins	6	16	12
Analog Outputs Pins	NA	NA	2 (DAC)
DC Current 3.3V Pin	50 mA	50 mA	800 mA
DC Current 5V Pin	NA	NA	800 mA
Flash Memory	32 KB	256 KB	512 KB
SRAM	2 KB (ATmega328)	8 KB	96 KB
EEPROM	1 KB (ATmega328)	4 KB	NA
Clock Speed	16 MHz	16 MHz	84 MHz
Price	S/. 30.00	S/. 65.00	S/. 90.00

La diferencia más importante entre los cuatro, es que todas las I/O del Arduino DUE trabajan a 3.3V, mientras que el resto de modelos lo hacen a 5V, un voltaje más común a la hora de encontrar los sensores y actuadores que se usarán en este proyecto, sin embargo, el Arduino DUE tiene una capacidad

de memoria y, sobre todo, una velocidad de proceso muy superior a sus rivales. Otra gran diferencia es la memoria disponible que hay entre ellos, mientras que el Arduino UNO tiene 32KB, el Arduino Mega 2560 tiene 256KB y el Arduino DUE 512KB.

Las placas de circuito impreso Arduino cuentan comúnmente con un microcontrolador y con componentes periféricos necesarios que son muy adecuadas para diversas aplicaciones, tal como se aprecia en la figura 14.



Figura 14: Placa Arduino con microcontrolador integrado. Fuente: (Store Arduino, 2020)

4.2.2.3 Evaluación Técnica de la Tecnología de Transmisión. Ante la gran cantidad de datos procedentes NB-IOT, LoRa y Sigfox son las tecnologías que encabezan las soluciones de redes de área amplia de bajo consumo (LPWAN) y que se encuentran en constante desarrollo y mejora. Es crucial entender que cada una de estas tres tecnologías desempeña un papel importante en el espacio IoT dependiendo del caso uso. Una comparación detallada que muestra los puntos fuertes y desventajas de cada una de estas tecnologías (NB-IOT, LoRa y Sigfox) se muestra en la tabla 13, la cual muestra que para diferentes casos de uso se puede utilizar una de las tecnologías en particular por sus ventajas frente a las otras a pesar que las tres son tecnologías LPWAN.

Tabla 13: Comparación de tecnologías LPWAN. (Mekki, 2019)

	NB-IoT	Sigfox	LoRaWAN
Modulación	QPSK	BPSK	CSS
Frecuencia	Licenciada (Bandas LTE)	No licenciada (Bandas IMS: 433/868/915 MHz)	No licenciada (Bandas IMS: 433/868/915 MHz)
Ancho de banda	200 kHz	100 Hz	250kHz & 125kHz
Velocidad	200 kbps	100 bps	50 kbps
Bidireccionalidad	Yes / Half-duplex	Limited / Half-duplex	Yes / Half-duplex
Mensajes x día (máx)	Unlimited	140 (UL), 4 (DL)	Unlimited
Carga útil (máx)	1600 bytes	12 B (UL), 8 B (DL)	243 bytes
Cobertura	1 km (urban) 10 km (rural)	10 km (urban) 40 km (rural)	5 km (urban) 20 km (rural)
Inmunidad de interferencia	Baja	Muy alta	Muy alta
Autenticación y encriptación	Si (Encriptación LTE)	No soporta	Si (AES 128b)
Velocidad adaptativa	No	No	Si
Handover	UE se conecta a solo 1 estación base	UE se conecta a 1 o más estaciones base	UE se conecta a 1 o más estaciones base
Permite red privada	No	No	Si

Además de las comparaciones técnicas observadas, se deben considerar muchos otros factores al momento de elegir la tecnología LPWAN adecuada para una aplicación de IoT, incluida la calidad del servicio, la duración de la batería, la latencia, la escalabilidad. Estos factores se analizarán a continuación:

- **Calidad de servicio:** Sigfox y LoRa emplean espectros sin licencia y tienen una alta inmunidad frente a la interferencia, sin embargo, no pueden ofrecer la misma QoS proporcionada por NB-IoT. NB-IoT emplea un espectro con licencia y un protocolo síncrono basado en LTE, que son óptimos para QoS a expensas del costo.
- **Vida de batería:** En Sigfox, LoRa y NB-IoT, los dispositivos finales están en modo suspendido la mayor parte del tiempo fuera de la operación, lo que prolonga la vida útil de las baterías de los dispositivos finales. Sin embargo, en NB-IoT se consume energía adicional debido a la comunicación síncrona y el manejo de QoS, y sus modos de acceso.
- **Latencia:** NB-IoT ofrece la ventaja de una baja latencia. A diferencia de Sigfox, LoRa proporciona clase C para manejar también latencia

bidireccional baja a expensas de un mayor consumo de energía. Pero, para aplicaciones que son insensibles Sigfox y LoRa clase A son las mejores opciones.

- Escalabilidad: Se consideran varias técnicas para hacer frente a esta característica de escalabilidad, como la explotación eficiente de la diversidad en un canal, así como en el tiempo y el espacio.

Una de las placas más sobresalientes en el ámbito de la tecnología LoRa es módulo LoRa Dragino que funciona como extensión de la placa Arduino y usa la técnica de modulación LoRa patentada por Semtech. Este módulo se muestra en la figura 15 y permite al usuario enviar datos y alcanzar rangos extremadamente largos a bajas velocidades de transmisión de datos. Proporciona comunicación de espectro extendido de rango ultra largo y alta inmunidad a interferencias mientras se minimiza el consumo de corriente. (Dragino, 2020)

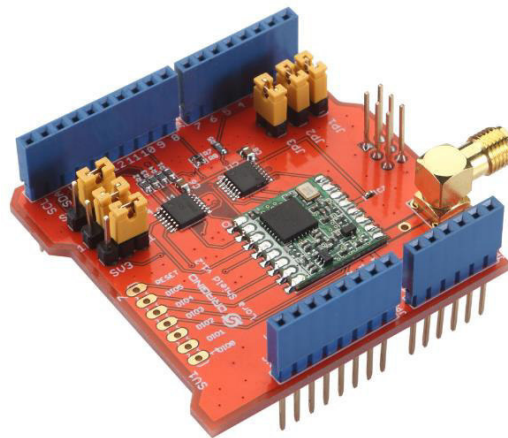


Figura 15: Placa Arduino con microcontrolador integrado. Fuente: (Dragino, 2020)

El módulo LoRa Dragino se basa en el chip Semtech SX1276 / SX1278, dirigido a aplicaciones de red de sensores inalámbricos, como sistemas de riego, medición inteligente, ciudades inteligentes y automatización de edificios, etc.

4.2.2.4 Evaluación Técnica del servidor IoT en la nube. Hay variedad de plataformas IoT a disponibilidad actualmente que ofrecen buenas características de almacenamiento y visualización de datos. Siendo Ubidots la plataforma escogida para el presente proyecto, ya que es compatible con varios dispositivos, como Arduino, Raspberry y mucho más. Permite conectar hardware y/o servicios de datos a esta plataforma en la nube caracterizada por ser agnóstica en cuanto a los dispositivos a emplear y brinda sus API REST para desarrollar soluciones personalizadas. Las interfaces gráficas que se pueden crear con Ubidots van desde posicionamiento de efectivos por GPS sobre un mapa hasta el diseño personalizado con widgets.

4.3 Descripción de la Implementación

En la presente sección se describe el proceso de implementación del prototipo para el monitoreo y control remoto de una red de distribución de agua potable.

4.3.1 Programación del Arduino Uno para lectura de sensores

Para la interconexión entre la placa Arduino Uno y el caudalímetro se debe colocar los 03 cables del sensor como sigue: el cable rojo debe ir al pin de salida de 5V, el cable negro al pin de GND y el pin amarillo es el que entrega la señal que leerá la placa y en este caso se usará el pin 3. Se usa este pin porque en la programación se usarán interrupciones y Arduino Uno solo puede generar interrupciones en los pines 2 y 3, pero el pin 2 ya será usado por el módulo LoRa.

El sensor YF-S201 tiene internamente un rotor cuyas paletas tiene un imán, la cámara en donde se encuentra el rotor es totalmente aislado evitando fugas de agua, externamente a la cámara tiene un sensor de efecto Hall que detecta el campo magnético del imán de las paletas y con esto el movimiento del rotor. El sensor de efecto Hall envía los pulsos por el cable amarillo del sensor, generando una onda cuadrada cuya frecuencia es proporcional al caudal de

acuerdo a la fórmula que provee el fabricante: $f \text{ (Hz)} = 7.5 \times Q \text{ (L/min)}$. Donde el factor de conversión proporcionado por el fabricante toma un valor de 7.5. Para explicar claramente el procesamiento del que se encargará el Arduino Uno, remitirse al diagrama de flujo que es muestra en la figura 16.

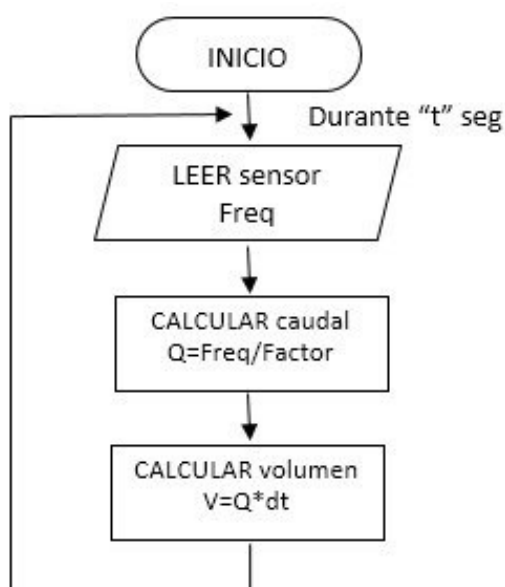


Figura 16: Diagrama de flujo para lectura de caudal y consumo de agua

Este diagrama sencillo muestra los pasos que llevará a cabo el Arduino, básicamente se debe de dar lectura a la señal de pulsos del sensor en un rango de tiempo “t” configurado a conveniencia, para fines prácticos este valor será de 5 segundos para posteriormente visualizar los datos de manera rápida. Definida la frecuencia de la señal del sensor se determinarán los datos deseados de caudal y volumen de agua siguiendo las fórmulas matemáticas para el cálculo de las mismas.

En base al diagrama de flujo anteriormente explicado, se escribe el código requerido en el Arduino Uno vía su interfaz IDE para obtener caudal y volumen de acuerdo a la información que provee el sensor, esto se ve en la figura 17.

```

volatile int NumPulsos; //variable para la cantidad de pulsos recibidos
int PinSensor = 3;      //Sensor conectado en el pin 3
float factor_conversion=7.5; //para convertir de frecuencia a caudal
float volumen=0;
long dt=0; //variación de tiempo por cada bucle
long t0=0; //millis() del bucle anterior

//---Función que se ejecuta en interrupción-----
void ContarPulsos ()
{
    NumPulsos++; //incrementamos la variable de pulsos
}
//---Función para obtener frecuencia de los pulsos-----
int ObtenerFrecuencia()
{
    int frecuencia;
    NumPulsos = 0; //Ponemos a 0 el número de pulsos
    interrupts(); //Habilitamos las interrupciones
    delay(5000); //muestra de 1 segundo
    noInterrupts(); //Deshabilitamos las interrupciones
    frecuencia=NumPulsos; //Hz(pulsos por segundo)
    return frecuencia;
}

void setup() {
    delay(1000);
    Serial.begin(115200);
    pinMode(PinSensor, INPUT);
    attachInterrupt(1,ContarPulsos,RISING); //(Interrupción 1(Pin3),función,Flanco de subida)
    Serial.println ("Sensor de caudal");
    t0=millis();
}

void loop() {
    float frecuencia=ObtenerFrecuencia(); //obtenemos la frecuencia de los pulsos en Hz
    float caudal_L_m=frecuencia/(factor_conversion*5); //calculamos el caudal en L/m
    dt=millis()-t0; //calculamos la variación de tiempo
    t0=millis();
    volumen=volumen+(caudal_L_m/60)*(dt/1000); // volumen(L)=caudal(L/s)*tiempo(s)

    Serial.println("Caudal= ");
    Serial.print (caudal_L_m,3);
    Serial.print ("L/min\tVolumen: ");
    Serial.print (volumen,3);
    Serial.println (" L");
}

```

Figura 17: Código para lectura de caudal y volumen

Una vez cargado el programa al Arduino, cada vez que se encienda esta placa ejecutará primeramente y solo una única vez el código de arranque definido en “void setup ()”, el cual define que el pin 3 está en modo puerto de entrada, para recibir la señal del sensor, a la vez que define que este pin 3 podrá trabajar con interrupciones. Todos los comandos que ejecutará de continuo la placa Arduino se encuentran en el bloque “void loop ()”, y el primer comando ordena ejecutar la función “ObtenerFrecuencia()” el cual a través del uso de

interrupciones cuanto la cantidad de pulsos de la señal del sensor en un lapso de 5 segundos. Se elige este valor de tiempo para posteriormente tener una visualización rápida de la información en este prototipo de solución. Teniendo el valor de la frecuencia de pulsos del sensor se vuelve a la función principal y en base a la fórmula especificada por el fabricante se calcula el caudal. El volumen de agua se calcula en base al caudal multiplicado por la diferencia de tiempo del muestreo del caudal, para esto se utiliza los comandos “mili()” que lleva la cuenta del correr del tiempo en valor de milisegundos. Finalmente se obtienen los valores de caudal y volumen, como muestra la figura 18.

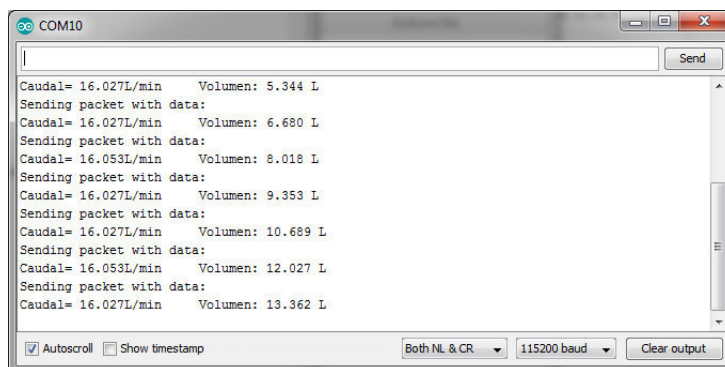


Figura 18: Lectura de caudal y volumen desde puerto serial de Arduino

4.3.2 Utilización del módulo Dragino Lora Shield para comunicación LoRa

El objetivo no es que el microprocesador muestre la información estando conectado vía puerto serial (USB) a una computadora sino que trabaje a través de la tecnología inalámbrica LoRaWAN, para ello se debe acoplar a la placa Arduino Uno el circuito Dragino Lora Shield, éste último permitirá establecer la comunicación con el dispositivo gateway mediante la tecnología de modulación LoRa haciendo uso de la frecuencia 915MHz, la cual es banda libre destinada para los servicios IMS en todo Latinoamérica.

El código en el entorno de desarrollo integrado de Arduino cambiara, ya que se debe añadir en primer lugar la librería “LoRa” en este entorno de programación y configurar los comandos que se deberán ejecutar para que se realice la correcta transmisión de la data obtenida por el sensor de caudal.

Para ello se escribe los comandos de inicialización de la comunicación LoRa en la función “void setup ()” siempre que opere en la banda de 915MHz y los comandos para la transmisión de los paquetes vía LoRa de la información referente al caudal y volumen de agua. Añadiendo los comandos descritos previamente se tiene el código final, como se detalla en la figura 19.

```
#include <LoRa.h>
volatile int NumPulsos; //variable para la cantidad de pulsos recibidos
int PinSensor = 3; //Sensor conectado en el pin 3
float factor_conversion=7.5; //para convertir de frecuencia a caudal
float volumen=0;
long dt=0; //variación de tiempo por cada bucle
long t0=0; //millis() del bucle anterior

//---Función que se ejecuta en interrupción-----
void ContarPulsos ()
{
    NumPulsos++; //incrementamos la variable de pulsos
}
//---Función para obtener frecuencia de los pulsos-----
int ObtenerFrecuencia()
{
    int frecuencia;
    NumPulsos = 0; //Ponemos a 0 el número de pulsos
    interrupts(); //Habilitamos las interrupciones
    delay(5000); //muestra de 5 segundo
    noInterrupts(); //Deshabilitamos las interrupciones
    frecuencia=NumPulsos; //Hz(pulsos por segundo)
    return frecuencia;
}

void setup() {
    delay(1000);
    Serial.begin(115200);
    pinMode(PinSensor, INPUT);
    attachInterrupt(1,ContarPulsos,RISING); //(Interrupción 1(Pin3),función,Flanco de subida)
    t0=millis();

    //LoRa Sender
    while (!Serial);
    Serial.println("LoRa Sender Test");
    // Initialize the LoRa radio on the shield.
    if (!LoRa.begin(915E6)) {
        Serial.println("Starting LoRa failed!");
        while (1);}
}

void loop() {
    float frecuencia=ObtenerFrecuencia(); //obtenemos la frecuencia de los pulsos en Hz
    float caudal_L_m=frecuencia/(factor_conversion*5); //calculamos el caudal en L/m
    dt=millis()-t0; //calculamos la variación de tiempo
    t0=millis();
    volumen=volumen+(caudal_L_m/60)*(dt/1000); // volumen(L)=caudal(L/s)*tiempo(s)

    LoRa.beginPacket();
    LoRa.print(volumen,3);
    LoRa.print("&");
    LoRa.print(caudal_L_m,3);
    LoRa.endPacket();
}
```

Figura 19: Código para lectura de caudal y volumen

Finalmente se tiene el código y las conexiones entre los módulos y el sensor, el nodo de usuario final quedaría implementado como se muestra en la figura 20. Cada 5 segundos este dispositivo enviará la información del sensor a través de la tecnología LoRa hacia el gateway del sistema.

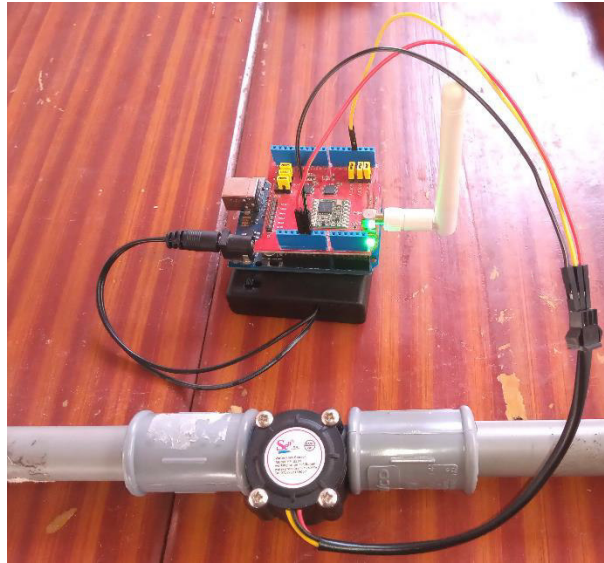


*Figura 20: **Nodo de usuario final implementado***

4.3.3 Configuración de nodo con sensor de caudal y electroválvula

Como parte de los objetivos del presente proyecto también es contar con nodos que además de monitorear el caudal puedan ser capaces de actuar sobre éste, habilitando o bloqueando el paso del agua por determinado tramo de la red de servicio de agua potable. Estos nodos serían más que todo con fines administrativos y para implementarlo hay que añadir al nodo de usuario un actuador, en este caso electroválvula de 12V, y la circuitería necesaria para su operación. Es posible configurar un pin de salida desde el Arduino para manejar un circuito que permita la activación o desactivación de la electroválvula modelo VALV-SOL-1P2-12V

Esta circuitería consistirá en el relé de 5V de entrada modelo JQC-3F-1C-5VDC, que tras ser accionado cerrará el circuito que alimenta la electroválvula VALV-SOL-1P2-12V por una fuente de 12V en continua. Como el relé tiene

una corriente mínima de operación de 70mA y la placa Arduino es capaz de proveer mediante un pin de salida hasta un máximo de 40mA, será necesario el uso de un amplificador de corriente, función a cargo del transistor modelo 13002. El esquema gráfico de este circuito se especifica en la figura 21.

Se toma el pin 5 del Arduino para que inyecte una señal digital de alta (5V) cuando se desee encender la válvula. El transistor 13002 tiene un factor de ganancia de 10, un valor pequeño, pero aun así útil y como el relé necesita una corriente de operación mínima de 70mA, se calcula que usando la resistencia de 550 ohmios se asegura una corriente de colector de 78mA suficiente para encender el relé y poner en funcionamiento la electroválvula.

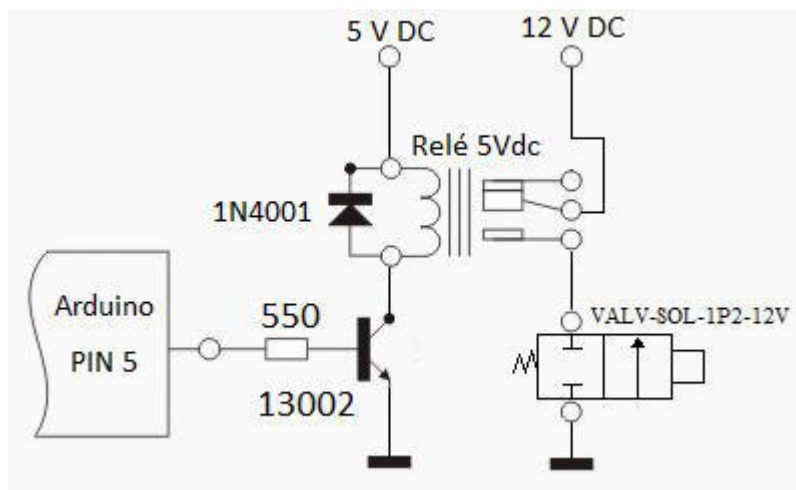


Figura 21: Circuito para accionar válvula de 12Vdc

Cabe mencionar que para esta aplicación se está usando una electroválvula solenoide de 12V con estado normalmente cerrada (NC) ya que el mercado de los dispositivos en la localidad solo ofrecía este tipo, pero para la aplicación a gran escala sería más adecuada el uso de una electroválvula normalmente abierta (NO), es decir, que permita el paso del agua a través de la tubería sin necesidad de consumir potencia. Una vez realizada la circuitería solo faltará incluir las instrucciones necesarias en el microprocesador de modo que habilite la electroválvula cuando reciba la señal indicada proveniente del gateway del sistema vía comunicación inalámbrica LoRa. Las líneas de código a incluir serán las que muestra la figura 22.

```

LoRa.receive();
String message = "";
packetSize = LoRa.parsePacket();
Serial.println(packetSize);

if (packetSize==3){
  digitalWrite(5, LOW);
  Serial.println("Estado de valvula: cerrada (OFF)");
}
if (packetSize==4){
  digitalWrite(5, HIGH);
  Serial.println("Estado de valvula: abierta (ON)");
}

```

Figura 22: Código para recibir mensajes LoRa y encender electroválvula

El comando “LoRa.receive()” habilitará las recepciones de paquetes vía LoRa a la placa Arduino, se contará la longitud de caracteres del paquete: si el paquete tiene el mensaje “LOW” el número de caracteres será 3 y el pin 5 pasará a estado de baja (0V), si el paquete tiene el mensaje “HIGH” el número de caracteres será de 4 y el pin 5 pasará a estado de alta (5V) encendiendo la electroválvula.

En este caso se sigue usando para la alimentación del Arduino y módulo LoRa una batería de 6V, 4 pilas 2AA conectadas en serie, y para la alimentación del circuito de la electroválvula se está usando un conversor AC-DC a 12 Vdc. Nuevamente cabe señalar que para la puesta en marcha de esta solución a gran escala se recomienda usar una batería de 12Vdc que le de autonomía energética a la solución. El nodo administrativo quedaría implementado como se muestra en la figura 23.

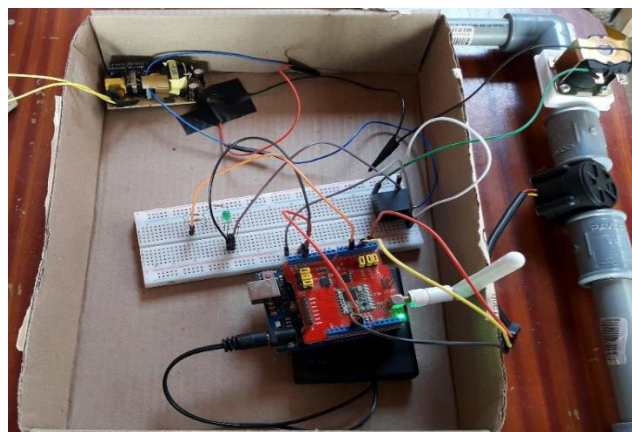


Figura 23: Nodo administrativo implementado

4.3.4 Configuración del gateway LoRaWAN

Se hará uso de un gateway elaborado localmente en base a los módulos con los que ya se ha trabajado antes y sumando un módulo extra que permitirá la comunicación por WiFi del Arduino, de modo que pueda transmitir la información recolectada de los dispositivos LoRa, que se pueden encontrar a kilómetros de distancia, con el servidor IoT en la nube. El diagrama de bloques presentado en la figura 24 resume las funciones que se espera cumpla el gateway, éste tendrá dos modos de operación:

- Recibir los paquetes del nodo vía comunicación LoRa y enviarlos mediante un módulo WiFi hacia el servidor de IoT en la nube con el objetivo de monitorear en el servidor los datos obtenidos del sensor.
- Recibir mensajes del servidor IoT y enviarlos al nodo final vía LoRa para ejecutar una acción de prendido/apagado en la electroválvula, de modo que se puede controlar este actuador de manera remota.

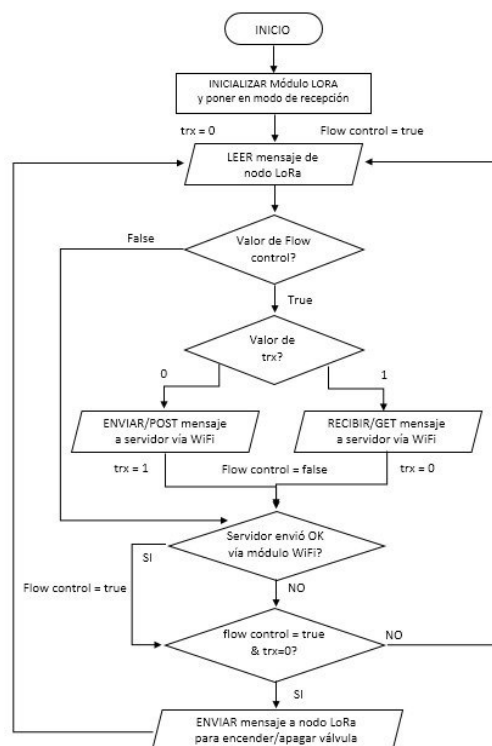


Figura 24: Diagrama de flujo del gateway LoRa

El primer bucle leerá el paquete LoRa del nodo final y enviará esta información en un mensaje desde Arduino al servidor IoT. El segundo bucle solo recibirá la respuesta de confirmación del servidor de que la información le llegó correctamente. El tercer bucle ejecutará el comando de solicitar información al servidor y el cuarto bucle será la respuesta del servidor con el mensaje de acuse y el mensaje del estado de la válvula, y se enviará este estado en un paquete LoRa al nodo final. De este modo se tiene un gateway LoRa capaz de entablar una comunicación bidireccional con el nodo final y con el servidor alojado en la nube.

El código de programación necesario para configurar el dispositivo Arduino con módulo LoRa y con módulo WiFi modelo ESP8266 para que actúe como un gateway es algo extenso, pero se explicará lo más importante de todo el código en lo que sigue. Primero hay que configurar el módulo WiFi ESP8266, mediante el lenguaje de programación de Arduino, proveyéndole las credenciales de acceso a la red local WiFi, a la vez que se le indica que lea los mensajes del Arduino. Ver figura 25.

```
#include "UbidotsESP8266.h"
namespace {
    const char * WIFISSID = "Put_your_WIFI_SSID_here"; // Assign your WiFi SSID
    const char * PASSWORD = "Put_your_WIFI_password_here"; // Assign your WiFi password
    const char * TOKEN = "Put_your_Ubidots_Token_here"; // Assign your Ubidots TOKEN
}

Ubidots client(TOKEN);

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    client.wifiConnection(WIFISSID, PASSWORD);
}

void loop() {
    client.readData(); // Reads the command from the logger
    delay(1000);
}
```

Figura 25: Código para habilitar módulo WiFi ESP8266

El módulo ESP8266 será el intermedio entre el Arduino y la nube IoT de Ubidots. Ya entrando en la configuración de la placa Arduino, lo primero será

definir algunos datos propios de la plataforma Ubidots, y que se detallarán más adelante, que tienen que ver con la identificación de la variable que se quiere visualizar y la variable que se quiere leer desde la nube, como se observa en la figura 26.

```
#include <SoftwareSerial.h> //to convert the pin 3 and 4 as serial connector
#include <LoRa.h>
namespace {
    bool flow_control = true; // control the flow of the requests
    const char * USER_AGENT = "UbidotsESP8266"; // Assign the user agent
    const char * VERSION = "1.0"; // Assign the version
    const char * METHOD = "POST"; // Set the method
    const char * TOKEN = "BBFF-G2f7x1cwQSlWfYJAb1zWGhM2pCr1C4"; // Assign your Ubidots TOKEN
    const char * DEVICE_LABEL = "ESP8266"; // Assign the device label
    const char * VARIABLE_LABEL = "caudal2"; // Assign the variable label
    const char * METHOD2 = "GET";
    const char * VARIABLE_VAL = "5f985f8f1d847206659fb5cf";}

char telemetry_unit[100]; // response of the telemetry unit
int trx=0;
char str_sensor0[10]; // Space to store values to send
SoftwareSerial mySerial(3,4); // RX, TX
```

Figura 26: Código del gateway LoRa: definición de constantes y variables

Un punto importante a tener en cuenta es que la placa Arduino Uno solo tiene un par de puertos seriales que se usan para observar el funcionamiento correcto del programa a través del monitor serial integrado en el gestor, es necesario establecer dos pines seriales extra para que permita la comunicación del Arduino con el módulo ESP8266.

La función principal del código ejecutará una función que habilita el modo escucha de los mensajes LoRa. Esta función se ejecuta cada vez que llega un nuevo paquete LoRa al gateway, esto es cada 5 segundos según lo establecido en el código del nodo. Luego en el primer bucle se arma el comando de envío de datos al servidor en la nube Ubidots, de acuerdo al conjunto de reglas definidas para que esta plataforma se pueda comunicar con el gateway, esto es, usando las API REST de Ubidots. Este primer bloque del código de la función principal se detalla en la figura 27.

```

void loop() {
    LoRa.onReceive(onReceive);}

void onReceive(int packetSize) {
    String message = "";    // read the packet
    while (LoRa.available()) {
        message += (char)LoRa.read();}

    if (flow_control) {
        float sensor0 = message.toFloat();
        dtostrf(sensor0, 4, 2, str_sensor0);

        if ( trx == 0) {
            char* command = (char *) malloc(sizeof(char) * 128);
            sprintf(command, "init#");
            sprintf(command, "%s%s/%s|s|s|", command, USER_AGENT, VERSION, METHOD, TOKEN);
            sprintf(command, "%s%s=>", command, DEVICE_LABEL);
            sprintf(command, "%s%s:s", command, VARIABLE_LABEL, str_sensor0);
            sprintf(command, "%s|end#final", command);
            Serial.println(command);
            mySerial.print(command);
            free(command);
            trx = 1;
        }else {

```

Figura 27: Código del gateway LoRa: envío de mensajes al servidor

Luego de este primer bucle unas líneas de comandos preguntan al servidor si se ha obtenido respuesta de acuse, pero esta respuesta no se da en el primer bucle, que está procesando el envío del mensaje, sino en el segundo bucle. En el tercer bucle se procede a armar y enviar el comando para petición de información referente al estado que debe tener la válvula (cerrada o abierta) procedente del servidor, los comandos se muestran en la figura 28 y nuevamente siguen los formatos definidos en el API REST de Ubidots.

```

    }else {
        char* data = (char *) malloc(sizeof(char) * 220);
        sprintf(data, "init#");
        sprintf(data, "%s%s/%s|s|s|", data, USER_AGENT, VERSION, METHOD2, TOKEN);
        sprintf(data, "%s%s", data, VARIABLE_VAL);
        sprintf(data, "%s|end#final", data);
        Serial.println(data);
        mySerial.print(data);
        free(data);
        trx = 0; }
    flow_control = false;
}

```

Figura 28: Código del gateway LoRa: solicitud de mensajes al servidor

El cuarto bucle va a ser el que mande la respuesta del servidor con el estado que debe tener la válvula en el nodo final LoRa. En base a este mensaje finalmente se envía un paquete al nodo LoRa indicando un mensaje “HIGH” si la válvula debe pasar a encendida o un mensaje “LOW” si debe apagarse, esto se ejecutará en el nodo de manera automática según la configuración ya antes presentada. La rutina a seguir en esta etapa por el gateway se muestra en la figura 29.

```
int i = 0;
while (mySerial.available() > 0) {
    telemetry_unit[i++] = (char)mySerial.read();
    flow_control = true;
}
if (flow_control) {
    Serial.write(telemetry_unit);
}
if (trx == 0 && flow_control==true) {
    int num;
    char* response; // Array to store parsed data
    response = strtok(telemetry_unit, "|");
    response= strtok(NULL, "|");
    num=atoi(response);
    if ( num == 0) {
        LoRa.beginPacket();
        LoRa.print ("Low");
        LoRa.endPacket();
    } else {
        LoRa.beginPacket();
        LoRa.print ("High");
        LoRa.endPacket();
    }
    memset(telemetry_unit, 0, i);
    LoRa.receive();
    memset(telemetry_unit, 0, i); // free memory
}
```

Figura 29: Código del gateway LoRa: envío paquetes al nodo LoRa

Estos cuatro bucles se ejecutarán una cantidad ilimitadas de veces para mantener la comunicación del gateway con el nodo final vía LoRa y con la plataforma en la nube Ubidots vía WiFi, siendo independiente de cualquier otro cableado excepto el de la fuente de alimentación. La implementación de este dispositivo finalmente quedaría como se observa en la figura 30 en donde se aprecia al Arduino Uno conectado al módulo Dragino Lora y a la vez al módulo WiFi ESP8266.

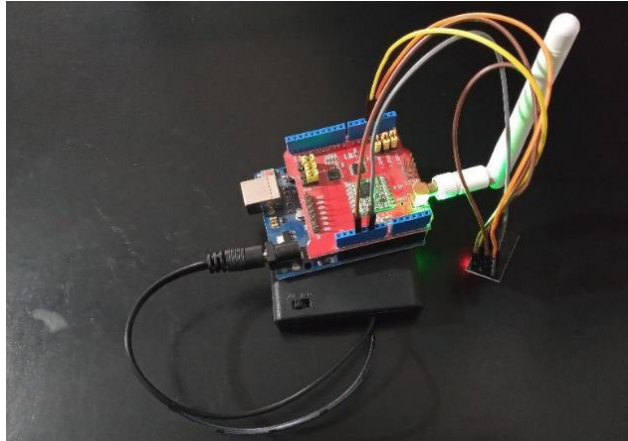


Figura 30: Gateway LoRa implementado

4.3.5 Servidor en la nube UBIDOTS

La plataforma Ubidots es el elemento final de la arquitectura de red LoRaWAN y el elemento que permitirá almacenar la gran cantidad de información de todos los sensores que se tengan distribuidos en la red, además de permitir la visualización de manera gráfica y amigable de las variables a medir de acuerdo al paso del tiempo. Esto hará posible que, con el monitoreo del flujo de agua, en distintos puntos de la red de servicio de agua potable, se tomen decisiones y el control de manera remota. La figura 31 muestra pantalla principal de esta plataforma.

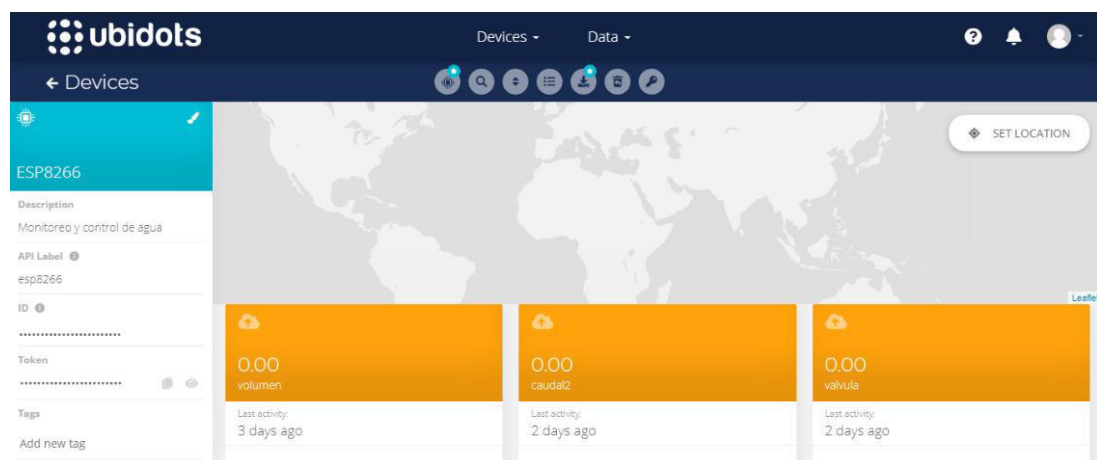


Figura 31: Plataforma Ubidots

La documentación de la REST API de Ubidots indica las credenciales y comando necesarios para establecer una comunicación entre servidor y gateway:

- Token: un conjunto de caracteres alfa-numéricos único por cuenta que viene a ser la llave que será usada en cada comando API para la comunicación.
- Etiqueta del dispositivo: nombre escrito en la plataforma, que tendrá el gateway para su identificación.
- Etiqueta de la variable: es el nombre que se le pone a la variable en Ubidots y se requiere para comandos de escritura.
- ID de la variable: es generada automáticamente cuando se crea una nueva variable en Ubidots y se requiere para comandos de lectura.
- Métodos (POST/GET): Se elige el método adecuado según el requerimiento, para enviar mensajes el método POST y para recibirlos el método GET.

Siguiendo las instrucciones y la estructura de cada comando API de Ubidots se realiza una prueba de conexión entre el gateway y la plataforma, para esta prueba se monitorea mediante el uso de la PC el procesamiento llevado a cabo por el gateway solo para comprobar que está operando correctamente, la figura 32 muestra la pantalla de PC.

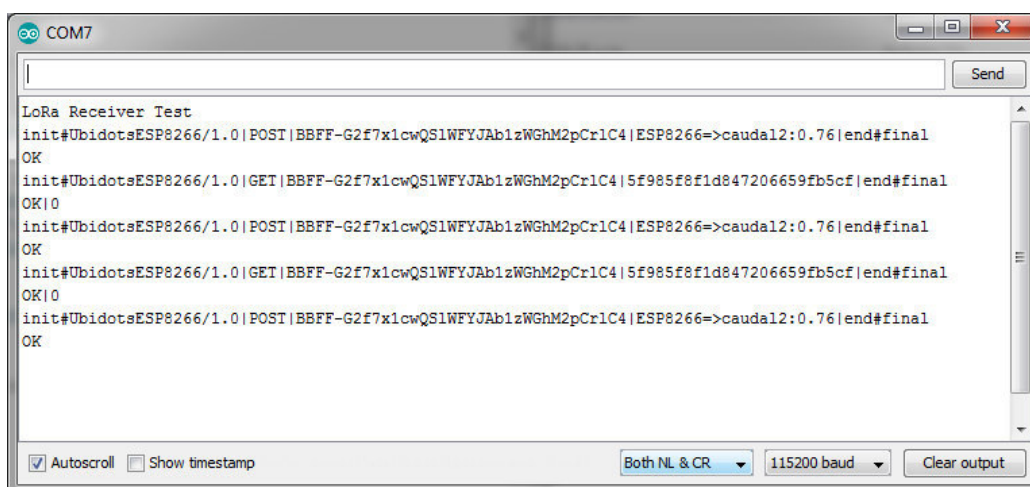


Figura 32: Gateway enviando comandos de lectura/escritura al servidor

4.3.6 Monitoreo de caudal y consumo de agua

El prototipo implementado en este proyecto tiene como objetivo simular el monitoreo y control de una red de distribución de agua potable, para lo cual se usará un pequeño circuito de tuberías de 1/2".

Esta maqueta representará lo que se puede implementar en un escenario real: donde cada nodo tendría que ser instalado cerca del suministro de agua potable de cada hogar. El nodo de usuario final enviará la información colectada por el sensor YF-S201 hacia el gateway vía LoRa, en este caso el gateway está ubicado en el piso inferior del área de prueba y considerando la buena penetrabilidad de la tecnología de comunicación inalámbrica no representa problemas. Tal como se muestra en la figura 33, esta maqueta hará la vez de una red de distribución de agua.



Figura 33: Puesta en marcha de nodo de usuario final

Una vez encendido el nodo y teniendo un flujo de agua a través de la maqueta, ya se puede observar los datos recolectados en el servidor Ubidots. Una primera forma de visualización de los datos es en formato de tabla especificando el valor leído y la fecha y hora precisas de la toma de la muestra. Esto se visualiza en la figura 34 y como se observa, cada mensaje está llegando al servidor luego de 20 segundos. Esto es así por la configuración del gateway que está trabajando en modo bidireccional en comunicación con

el servidor, como se explicó anteriormente, y que requiere ejecutar 4 bucles para enviar un mensaje al mismo. En la práctica este rango de muestreo puede ser modificado para tener lecturas a cada minuto.

DATE	VALUE	CONTEXT	ACTIONS
2020-10-27 12:24:21 -05:00	3.15	0	
2020-10-27 12:24:10 -05:00	3.15	0	
2020-10-27 12:15:36 -05:00	2.21	0	
2020-10-27 12:15:26 -05:00	2.21	0	
2020-10-27 12:15:06 -05:00	2.00	0	
2020-10-27 12:14:55 -05:00	1.82	0	
2020-10-27 12:14:46 -05:00	1.64	0	
2020-10-27 12:14:35 -05:00	1.47	0	
2020-10-27 12:14:25 -05:00	1.31	0	

Figura 34: Visualización de datos en Ubidots

Otra forma de visualizar los datos obtenidos y que Ubidots ofrece es a través de una gráfica cuyos ejes horizontal y vertical representan el cambio del tiempo versus el cambio del valor de la variable, respectivamente. En la figura 35 se ve el gráfico del consumo de agua expresada en litros, la misma data vista anteriormente en forma de tabla está vez gráficamente para un rápido monitoreo y en tiempo real.

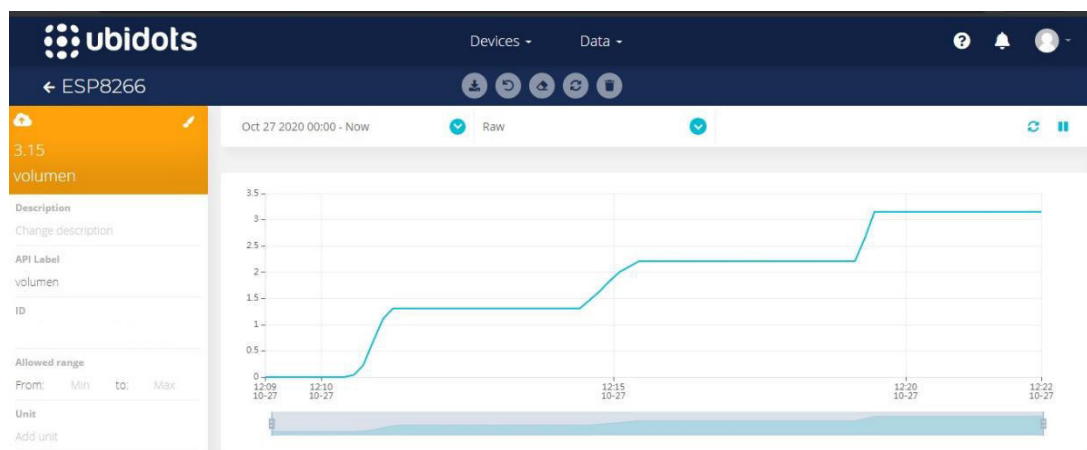


Figura 35: Gráfico de la variación del volumen en Ubidots

Asimismo, se puede visualizar el caudal, como se aprecia en la figura 36, en el mismo periodo del tiempo, ya que el sensor mide caudal y volumen a la vez. El valor del caudal está expresado en litros por minuto.

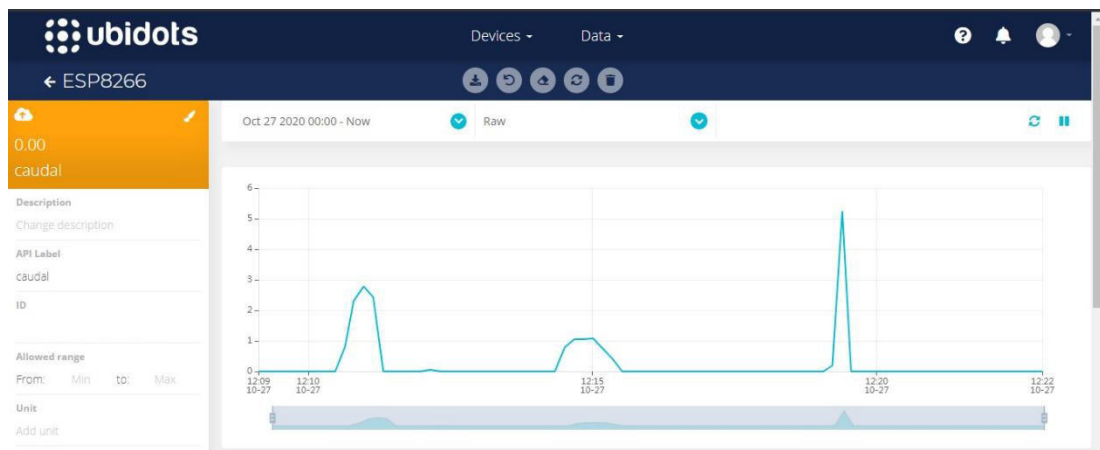


Figura 36: **Gráfico de la variación del caudal en Ubidots**

También se puede tener ambas gráficas en paralelo como en la figura 37. Esta comparativa muestra como con el aumento del caudal en determinado momento eleva el volumen de agua consumido, los flancos de la curva del volumen consumido con más rápidos cuando el caudal tiene un mayor valor.



Figura 37: **Gráficos de variación de caudal y volumen en Ubidots**

El objetivo de la solución propuesta es que una vez teniendo estas gráficas tanto el servidor como el cliente puedan visualizar esta información. Por

ejemplo, el cliente podría ver en tiempo real su consumo de agua versus el caudal de modo que pueda generar una consciencia de control sobre su consumo de agua al mes o detectar si tiene una fuga dentro del hogar al tener una variación de caudal imprevista. Por su parte el operador de la red de agua potable puede tomar los datos del volumen de agua consumido para la facturación correspondiente.

4.3.7 Monitoreo y control de caudal

Para este punto ya se tienen todos los dispositivos necesarios, los cuales se instalan en el pequeño circuito de tuberías de agua para simular como se comportaría el nodo administrativo cuando se posicione en un tramo de la red de distribución que necesite ser monitoreada. Ver figura 38.



Figura 38: **Puesta en marcha de nodo administrativo**

En esta maqueta se aprecia que la electroválvula y el sensor de caudal están siendo controlador por el Arduino Uno y la circuitería detallada anteriormente. Una vez que se encienda la placa Arduino comenzará a transmitir la información recolectada del caudal y estará habilitado para recibir también la información de estado de la válvula desde el servidor, para que este estado cambie según se configure en el servidor. El estado inicial de la válvula se define en apagado (OFF). Ver figura 39.

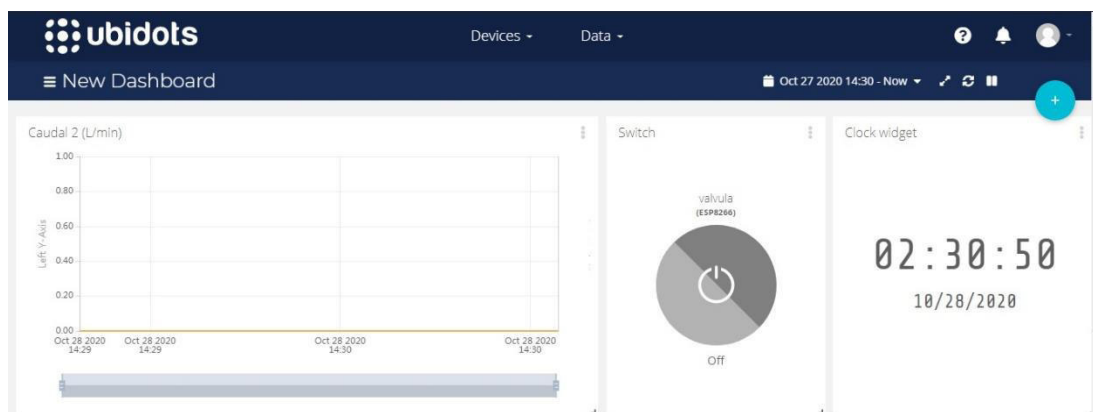


Figura 39: Válvula en OFF en Ubidots – Sin flujo de agua

Como la electroválvula se encuentra apagada no permite un flujo de agua a través de las tuberías y por tanto tampoco se registra variación de caudal en el gráfico de Ubidots. Cambiando el estado de la válvula desde el servidor, como se observa en la figura 40, ahora si se tiene un flujo de caudal registrado que varía conforme a la información del sensor, en este caso se comenzó inyectando una mayor presión al circuito de tuberías y luego se redujo esta presión, todo queda registrado.

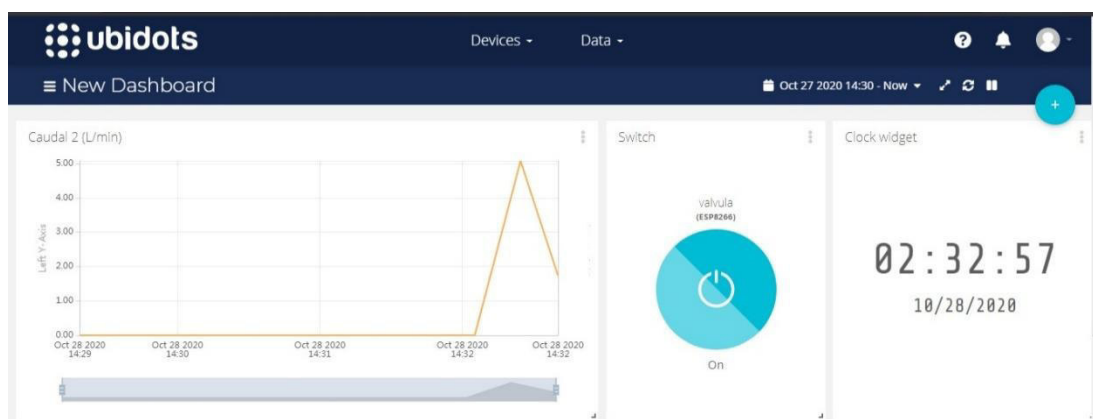


Figura 40: Válvula en ON en Ubidots – Hay flujo de agua

Desde el lado de la maqueta se observa el cambio de estado al iniciarse el flujo de agua a través de la ductería, la foto mostrada en la figura 41 muestra

que ya hay flujo de agua y detalla el tiempo de la captura acorde al cambio de estado del servidor.



Figura 41: Válvula en ON en sistema – Hay flujo de agua

La importancia de incluir este nodo administrativo en un sistema existente de distribución de agua potable radica en el hecho de que permite al operador monitorear el caudal en tramos de importancia para el abastecimiento de agua a zonas grandes, de modo que el operador pueda estimar cual es el valor del flujo normal de un día común con las gráficas obtenidas del servidor IoT y en base a este valor saber reconocer cuándo se presenta una fuga de agua que desencadene que el caudal y tomar control al respecto de manera totalmente remota y en tiempo real. Así la atención por fugas de agua tendría un tiempo de respuesta mucho menor al actual y este tiempo más efectivo permitiría reducir las pérdidas económicas generadas por agua no facturada y el costo de los equipos y personal especializados para remediar estos eventos infortunados. Por otro lado, con la información generada también es posible identificar, tras descender el caudal sin motivo de fuga, que se puede tratar de un acto vandálico por conexiones clandestinas de agua e identificar la zona precisa de este hecho, en base a la localización del nodo administrativo.

Los diversos casos de aplicación dentro de la red de distribución de agua permiten tener una un sistema de gestión y control inteligente que solo suma ventajas en cuanto a la administración de este recurso hídrico y coloca a la

empresa de servicio en una categoría de empresa del futuro, capaz de utilizar la tecnología IoT para el control de su red. Por su parte el cliente final tendría también la ventaja de monitorear en tiempo real y de forma precisa su consumo de agua y saber en todo momento si el valor facturado está acorde a ese consumo, evitando falsas lecturas o errores humanos en el proceso del muestreo de estas variables.

4.4 Conclusiones

- El uso del sensor YF-S201 fue el adecuado debido a que tiene un rango amplio de medición de caudal (1 – 30 L/min) y un nivel de presión máximo soportado (1750KPa) que hace de este modelo de sensor el ideal para cualquier aplicación residencial dentro del país.
- El uso de la electroválvula VALV-SOL-1P2-12V permitió el adecuado control del cierre y apertura de una ductería de agua con un mínimo consumo.
- El uso de la tecnología de comunicación inalámbrica LoRaWAN permitió tener un largo alcance con un consumo mínimo de potencia entre el nodo y el gateway del prototipo implementado.
- La implementación del nodo Lora para usuario final permitió tener una visualización precisa, en tiempo real y amigable a través de la interfaz del servidor Ubidots que sirve para la generación de consciencia de consumo de parte del usuario final y su conocimiento para verificar su facturación.
- La implementación del nodo Lora para usuario administrativo permitió que se tenga un registro del caudal en un tramo importante de la red de distribución de agua y tener el control rápido y totalmente remoto sobre el cierre o apertura de ese tramo de la red, ante cualquier eventualidad indeseada: fugas, vandalismo, etc. Esto se traduce en un sistema más eficaz y reducción de costes.

CAPÍTULO V

RECOMENDACIONES

- Tomar en cuenta la banda de trabajo en la que se va a establecer la comunicación LoRa, ya que varía dependiendo la región y país, en este caso el organismo encargado, el MTC (Ministerio de Transporte y Comunicaciones) facilita el uso en la banda de 915-928MHz para uso no licenciado destinado a IMS bajo ciertos parámetros regulatorios.
- En este prototipo se usó la electroválvula de 12V en estado normalmente cerrado (NC) por no hallarse el modelo normalmente abierto (NO) en el mercado, se recomienda el uso del modelo NO para reducir el consumo de energía, de modo que solo consuma corriente cuando se bloquee la tubería que se da de forma temporal.
- Para fines prácticos en este prototipo se usó para energizar los nodos LoRa un conjunto de pilas y fue más que suficiente para semanas de pruebas y depuración de códigos, pero para su aplicación en escenario real se recomienda el uso de baterías que especifiquen un tiempo de vida lo mayor posible.
- La plataforma Ubidots fue una buena opción como servidor IoT, pero si se requieren funciones mucho más especializadas o exportar los datos obtenidos para procesar en otra herramienta es necesario una cuenta vip, para lo cual se recomienda primero comparar lo que ofrecen otras plataformas con la misma modalidad de pago.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

ACCENT-SYSTEMS. (2018). Haciendo que los objetos puedan sentir. Obtenido de accent-systems.com/es/blog/objetos-puedan-sentir-sensores/

ARSYS. (2019). El impacto del IoT en el Cloud, y viceversa. Obtenido de <https://www.arsys.es/blog/iot-cloud/>

Briceño, A. (18 de Mayo de 2017). Chorrillos es el distrito donde se detecta más robo de agua potable. *El Comercio*, pág. 1. Obtenido de <https://elcomercio.pe/lima/sucesos/sedapal-chorrillos-distrito-detecta-robo-agua-potable-423435-noticia-2/>

Cestti, R. (2020). *El agua en la primera línea de defensa frente al Covid-19*. Lima: OTASS. Obtenido de https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1008446/El_agua_en_la_primera_l%C3%ADnea_de_defensa_frente_al_COVID-19.pdf

Dragino. (2020). Dragino LoRa Shield V1.0. [Figura]. Obtenido de https://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora_Shield

Dragino. (2020). Manual of Arduino Shield featuring LoRa. Obtenido de https://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora_Shield

ELEKTOR. (2020). Dragino LoRa IoT Development. [Figura]. Obtenido de <https://www.elektor.fr/dragino-lora-iot-development>

- Fundación Telefónica. (2019). *fundaciontelefonica.com*. Obtenido de <https://telos.fundaciontelefonica.com/la-cofa/las-tecnologias-lpwan-un-internet-de-las-cosas-low-cost/>
- GHIDRO. (2020). *ghidro.com.br*. Obtenido de [ghidro.com.br](https://www.ghidro.com.br/hidroview/): <https://www.ghidro.com.br/hidroview/>
- HARBOR RESEARCH. (2015). What exactly is the Internet of Things?. [Figura]. Obtenido de <https://s3.amazonaws.com/postscapes/IoT-Harbor-Postscapes-Infographic.pdf>
- IOTFORALL. (2020). *iotforall.com*. Obtenido de <https://www.iotforall.com/bluetooth-iot-applications>
- IOTFORALL. (2020). *ZigBee Wireless Technology Report*. [Figura]. Obtenido de [Figura]: <https://www.iotforall.com/bluetooth-iot-applications>
- LORA ALLIANCE. (2015). LORA Network Architecture. [Figura]. Obtenido de <https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>
- LORA ALLIANCE. (2015). LORAWAN. What is it? Obtenido de <https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>
- Malik, S. (2016). NB-LTE Network Architecture [Figura]. En *Long Term Evolution for IoT (Narrow Band LTE-Cellular IOT) a short note on design, techonology and applications*.
- Mekki, K. (2019). Overview of LPWAN technologies: Sigfox, LoRa, and NB-IoT. [Tabla]. En *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment*.
- Mercer, D. (2019). *Global Connected and IoT Device Installed Base Forecast*. [Figura]. Obtenido de <https://www.strategyanalytics.com/access->

services/devices/connected-home/smart-home/reports/report-detail/global-connected-and-iot-device-forecast-update?slid=1176142&spg=1

Moura, E. (2019). *Hands-On IoT Solutions with Blockchain*. [Figura].

Pasqua, E. (2018). *Global LPWAN Market size 2017-2023* [Gráfico]. Obtenido de www.iot-analytics.com/lpwan-market-report-2018-2023-new-report/

Salgueiro, G., Barton, R., & Hanes, D. (2017). *IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things*. Cisco Press.

Semtech. (2020). LORA and LORAWAN. Obtenido de [lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/](http://developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/)

Sigfoxs Support. (2020). *sigfox.com*. [Figura]. Obtenido de https://www.sigfox.com/en/what-sigfox/technology#id_technology

Store Arduino. (2020). Arduino Uno. [Figura]. Obtenido de <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>

Strategy Analytics. (2019). *Global IoT devices*. Obtenido de www.strategyanalytics.com/access-services/devices/connected-home/smart-home/reports/report-detail/global-connected-and-iot-device-forecast

SUNASS. (2020). *Benchmarking regulatorio 2020*. Lima: Dirección de Fiscalización de la SUNASS. Obtenido de SUNASS: <https://www.sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2020/11/BENCHMARKING-REGULATORIO-DE-LAS-EPS-2020-DATOS-2019.pdf>

SUNASS. (24 de Junio de 2020). *sunass.gob.pe*. Obtenido de [sunass.gob.pe: https://www.sunass.gob.pe/lima/sunass-atendio-a-mas-de-15-mil-usuarios-a-traves-de-sus-canales-remotos-durante-los-100/](https://www.sunass.gob.pe/lima/sunass-atendio-a-mas-de-15-mil-usuarios-a-traves-de-sus-canales-remotos-durante-los-100/)

Telefónica. (15 de Febrero de 2017). *telefonica.com*. Obtenido de <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/telefonica-huawei-y-kamstrup-lanzan-en-chile-el-primer-proyecto-con-tecnologia-narrowband-iot-en-latinoamerica/>

Wedd, M. (2020). *Bluetooth Topologies*. [Figura]. Obtenido de <https://www.iotforall.com/bluetooth-iot-applications>