PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

SEDE ESMERALDAS



CARRERA:

INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN

PREVIO AL GRADO ACADÉMICO DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN

TEMA DE INVESTIGACIÓN:

OPTIMIZACIÓN DE TRÁFICO DE DATOS EN EL INTERNET DE LAS COSAS MÉDICAS UTILIZANDO UN SIMULADOR DE REDES DE EVENTOS DISCRETOS Y LoRa: CASO DE ESTUDIO CENTROS MÉDICOS DE LA PUCESE

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

REDES Y COMUNICACIONES

AUTOR:

LUIS ALEJANDRO RODRIGUEZ BENALCÁZAR

ASESOR:

MGT. MANUEL NEVAREZ TOLEDO

ESMERALDAS, 2023

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Trabajo de integración curricular aprobado luego de haber dado cumplimiento a los requisitos exigidos por el Reglamento de Grado de la PUCESE previa la obtención del título de INGENIERO EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN.

..……

Mgt. Manuel Nevárez Toledo

Tutor de integración curricular

..……

PhD. Pablo Pico Valencia

Lector 1

..……

Mgt. Homero Velastegui Izurieta

Lector 2

..……

Mgt. Xavier Quiñonez Ku

Coordinador del Área Industria, Tecnología y Comunicación

AUTORÍA

Yo, LUIS ALEJANDRO RODRIGUEZ BENALCÁZAR con número de cédula de identidad 0803340116, en calidad de autor de la investigación titulada "OPTIMIZACIÓN DE TRÁFICO DE DATOS EN EL INTERNET DE LAS COSAS MÉDICAS UTILIZANDO UN SIMULADOR DE REDES DE EVENTOS DISCRETOS Y LoRa: CASO DE ESTUDIO CENTROS MÉDICOS DE LA PUCESE", presentada como tesis de grado para la obtención del título de "Ingeniero en Tecnologías de la Información" en la PUCESE, manifiesto que los resultados obtenidos son de mi total responsabilidad y que se han respetado las fuentes de información consultadas, realizando las citas correspondientes.

Al mismo tiempo declaro que todo el contenido incluyendo resultados, discusión, conclusiones, recomendaciones y otros efectos legales y académicos que se desglosan, son y serán exclusiva responsabilidad legal y académica del autor y de la PUCESE.

..…….
Luis Alejandro Rodríguez Benalcázar
C.I. 0803340116

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de integración curricular a mi familia, quienes han sido mi mayor fuente de apoyo, amor y motivación a lo largo de toda mi vida. Sin ellos, este logro no habría sido posible.

A mi madre y a mi padre, quienes me enseñaron desde pequeño la importancia del esfuerzo, la perseverancia y la dedicación en todo lo que hago. Gracias por creer en mí y por brindarme siempre su cariño y su apoyo incondicional.

A mis hermanos, quienes siempre me han animado a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Gracias por ser mi familia y por ser mis amigos.

A mis abuelos, quienes me transmitieron valores y enseñanzas que han sido fundamentales para mi formación como persona. Gracias por su amor, su sabiduría y su ejemplo de vida.

También dedico esta tesis a mis amigos, quienes me han acompañado y apoyado en todo momento. Gracias por sus risas, sus consejos y por ser mi segunda familia.

Por último, dedico este trabajo a todas las personas que han cruzado mi camino y han contribuido a mi formación académica y personal. A los profesores y compañeros de clase, a los participantes de mi estudio y a todos aquellos que, de alguna manera, han dejado una huella en mi vida.

Gracias a todos ellos, he aprendido mucho y he logrado alcanzar una meta importante en mi vida. Espero poder retribuirles algún día todo lo que han hecho por mí.

Luis Alejandro Rodriguez Benalcázar

AGRADECIMIENTO

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me ayudaron en el camino hacia la finalización de este trabajo de integración curricular.

En primer lugar, quisiera agradecer a mis padres Hermisul Rodriguez Alarcón y Roxana Benalcázar Camacho, por su orientación, paciencia y dedicación. Sus consejos me ayudaron a ser la persona que soy y el profesional que me estoy convirtiendo, sin ustedes este logro no hubiera sido posible, porque además de darme la vida me dieron la oportunidad de estudiar y eso nunca lo olvidaré.

Quisiera agradecer a mis hermanos Ronald Rodríguez y Khaleesi Rodríguez por su apoyo incondicional. Me brindaron palabras de aliento, me animaron en momentos difíciles y me ayudaron a mantenerme motivado durante todo el proceso.

Quiero agradecer a mi novia, Irina Bedoya, por su apoyo y comprensión durante este proceso. Su paciencia y palabras de aliento fueron una gran ayuda para mantenerme motivado y concentrado en mi trabajo. Su presencia ha sido fundamental y le agradezco todo lo que ha hecho por mí.

También quisiera agradecer a Stalin Francis por su compañía y preocupación por hacer que las cosas salgan bien. Sus comentarios y sugerencias me ayudaron a mejorar mi trabajo y a alcanzar mis objetivos.

Además, quisiera agradecer a los participantes de mi estudio por su tiempo y disposición para compartir sus experiencias y conocimientos conmigo. Sin ellos, este estudio no habría sido posible.

Finalmente, quisiera agradecer a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron a mi formación académica y personal. Sus enseñanzas, consejos y comentarios me ayudaron a crecer y a convertirme en la persona que soy hoy.

Gracias a todos ellos, he aprendido mucho y he logrado alcanzar una meta importante en mi vida. Les estaré siempre agradecidos por su apoyo y ayuda en este camino.

Luis Alejandro Rodriguez Benalcázar

ÍNDICE DE CONTENIDO

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN II
AUTORÍA III
DEDICATORIA IV
AGRADECIMIENTO V
RESUMEN X
ABSTRACT XI
INTRODUCCIÓN 1
Presentación de la investigación 1
Planteamiento del problema 2
Justificación 2
Objetivos 3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO 4
1.1 Bases conceptuales 4
1.1.1 Arquitectura IoT 4
1.1.2. Tecnologías inalámbricas 8
1.1.3 Topologías de red 8
1.1.4. Herramientas para simulador de red 10
1.2. Antecedentes 12
1.3 Fundamentación legal 15
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA 17
2.1 Delimitación espacio/temporal 17
2.2 Tipo de investigación 17
2.3 Métodos de investigación 17
2.4 Técnicas de investigación 17
2.5 Operacionalización de variables 18
2.6 Técnicas de procesamiento de datos 20
CAPÍTULO III: RESULTADOS 21
3.1 Modelo de simulación 21
3.2. Evaluación y análisis de resultados 23
3.2.1 Escenarios 23
3.2.2 Calidad de datos 26
CAPITULO IV: DISCUSIÓN 28
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 30
5.1 Conclusiones 30
5.2 Recomendaciones 31

REFERENCIAS 32
ANEXOS 34
ANEXO 1: Instrumento para medir nivel de satisfacción personal PUCESE 34
ANEXO 2: resultados de medir nivel de satisfacción personal PUCESE..... 35

Índice de figuras

Figura 1 Capas que constituyen la arquitectura de alto nivel para IoT [5]..... 5
Figura 2 Modelo de 7 capas una arquitectura real del IoT. 6
Figura 3 Ejemplo de arquitectura IoT aplicado a la salud IoMT. 6
Figura 4 Un dispositivo comercial para censar varias funciones del cuerpo humano..... 7
Figura 5 a) Topología ad-hoc b) Topología estrella c) Topología mesh [15]. 9
Figura 6 Módulo gateway simulado en OMNET++ junto a todos sus atributos y eventos. 11
Figura 7 Modelo de interacción entre gateway y diferentes topologías de red. 12
Figura 8 Funcionamiento de un gateway LoRa para comunicar dos protocolos de red distintos [19]. 12
Figura 9 Modelo de simulación. 21
Figura 10 Distancia entre los dos puntos de la PUCESE. 23
Figura 11 Energía consumida por nodos en cada SF. 24
Figura 12 Energía consumida según el tamaño del Payload. 25

Índice de tablas

Tabla 1 Tecnologías inalámbricas de baja frecuencia. 8
Tabla 2 Comparación entre herramientas de simulación de red [17]. 10
Tabla 3 Variables en indicadores sujetos a investigación. 19
Tabla 4 Ubicación de los dos campus de la PUCESE ... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 5 Parámetros para la simulación. ..... **¡Error! Marcador no definido.**

RESUMEN

Esta investigación se enfoca en la optimización del tráfico de datos en el Internet de las Cosas médicas (IoMT) utilizando un simulador de redes de eventos discretos y LoRa. El caso de estudio se enfoca en los centros médicos de la PUCESE en la provincia de Esmeraldas, Ecuador. El objetivo general de la investigación es describir la infraestructura IoT-LoRa adecuada para la captura, transmisión, almacenamiento y procesamiento de datos médicos. Para lograr este objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos: determinar la situación actual de los centros médicos de la PUCESE con relación a la adquisición, administración y almacenamiento de la información, analizar las bases teóricas sobre los dispositivos IoT y comunicación de datos, y realizar una implementación de la red LoRa mediante la simulación y despliegues experimentales en OMNeT++ utilizando el Framework FLoRa. La investigación fue de tipo mixta: cuantitativa y cualitativa, además se emplearon métodos de investigación como lo fueron el método deductivo, experimental y descriptivo. La técnica empleada fue la experimentación y se establecieron 3 variables de operacionalización. La variable dependiente fue el factor de dispersión (SF) y las variables independientes el consumo de energía y el tiempo en el aire (ToA). Se desarrolló un modelo de simulación compuesto por seis elementos que se encargaron de demostrar que la cobertura de la red varió significativamente en función de los parámetros de configuración. Se llevaron a cabo dos escenarios con la finalidad de examinar el efecto que causa la manipulación del factor de dispersión (SF) sobre el consumo de energía y el tiempo en el aire (ToA). Los resultados mostraron que la variación del SF influye tanto en la cantidad de energía que consumen los dispositivos como en el tiempo que tarda un paquete en ser transmitido por un nodo y recibido por otro (ToA), lo que demuestra la importancia de considerar este parámetro en el diseño y despliegue de redes inalámbricas. Con los resultados de esta investigación se determinó una manera óptima de configurar una red LoRa para que dispositivos IoMT tengan más tiempo de vida hasta volver a necesitar una nueva carga de energía, haciendo muy rentable realizar una implementación de estos dispositivos.

Palabras claves: cuidado de la salud, IoT, IoMT, infraestructura IoT-LoRa, simulador de eventos discretos, framework FLoRa, OMNET++, INET.

ABSTRACT

This research focuses on the optimization of data traffic in the Internet of Medical Things (IoMT) using a discrete event network simulator and LoRa. The case study focuses on PUCESE medical centers in the province of Esmeraldas, Ecuador. The general objective of the research is to describe the IoT-LoRa infrastructure suitable for the capture, transmission, storage and processing of medical data. To achieve this objective, the following specific objectives are proposed: to determine the current situation of the PUCESE medical centers in relation to the acquisition, management and storage of information, to analyze the theoretical bases on IoT devices and data communication, and to implement the LoRa network through simulation and experimental deployments in OMNeT++ using the FLoRa Framework. The research was of a mixed type: quantitative and qualitative, and research methods such as the deductive, experimental and descriptive methods were used. The technique used was experimentation and 3 operationalization variables were established. The dependent variable was the dispersion factor (SF) and the independent variables were energy consumption and time in the air (ToA). A simulation model was developed consisting of six elements that were responsible for demonstrating that the network coverage varied significantly as a function of the configuration parameters. Two scenarios were conducted to examine the effect of manipulating the spreading factor (SF) on power consumption and time-on-air (ToA). The results showed that the SF variation influences both the amount of energy consumed by the devices and the time it takes for a packet to be transmitted by one node and received by another (ToA), demonstrating the importance of considering this parameter in the design and deployment of wireless networks. The results of this research determined an optimal way to configure a LoRa network so that IoMT devices have a longer lifetime until they need a new energy load, making it very cost-effective to implement these devices.

Keywords: healthcare, IoT, IoMT, IoT-LoRa infrastructure, discrete event simulator, FLoRa framework, OMNET++, INET.

INTRODUCCIÓN

Presentación de la investigación

El cuidado de la salud (healthcare) en el entorno laboral, es uno de los temas de interés de esta investigación; la actividad laboral definida según [1], como una actividad humana voluntaria y coordinada, que transforma a la persona que lo ejecuta, es realizada en un tiempo dado y orientada hacia una finalidad específica que es la producción de bienes y servicios exteriores al sujeto, pero a veces el trabajo es una actividad impuesta por la fuerza de la necesidad y su ejecución no está necesariamente de acuerdo con el normal funcionamiento biológico, psicológico y mental de quien lo ejecuta, generándole daños a la salud.

El Internet de las Cosas (IoT) que es el otro tema de interés de esta investigación, está demostrando ser de gran ayuda para el cuidado de la salud, esto se corrobora puesto que en muchas ciudades el Internet de las cosas médicas (IoMT), ha ayudado a frenar la velocidad del COVID-19, mejorando la seguridad del personal de primera línea, e incrementando la eficacia disminuyendo la severidad de la enfermedad en vidas humanas, decrementando la tasa de mortalidad [2].

El IoT es una variedad especial de arquitectura cliente servidor, que elimina muchos errores que cometían los seres humanos al generar y transmitir la información; los dispositivos IoT garantizan la confiabilidad e integridad de la información siempre y cuando la infraestructura tecnológica sea adecuada y eficientemente asignada.

Garantizar la salud y bienestar de la fuerza laboral en una institución es de gran importancia, a tal punto que algunas instituciones invierten en centros médicos privados que estén monitoreando a su personal con bastante frecuencia ya que de la salud de ellos depende la productividad y por ende la salud de su estado financiero. El concepto de IoMT implica el uso de dispositivos electrónicos que capturan o monitorean datos y son conectados a una nube privada o pública, comunicándose después de habilitar ciertos eventos que transfieren la información de ida y vuelta [3].

En la ciudad de Esmeraldas la PUCESE es una institución que vela por el bienestar de su personal, docentes, empleados y estudiantes, para lo cual cuenta con 2 centros médicos que les brinda el servicio de cuidado de la salud, el personal se realiza un chequeo periódico donde se le registra peso, la presión arterial, la estatura; luego el médico lo valora realizando ciertas preguntas sobre su estilo de vida, la cual es registrada de forma manual en la carpeta.

Planteamiento del problema

Las IoMT, es el conjunto de sensores, actuadore, router, medios de comunicación de datos, hasta llegar a los servidores, conformados en 7 capas, todas una arquitectura armada para la recolección de datos médicos desde los sensores que analizan al paciente hacia un servidor en la nube y viceversa; esta infraestructura debe contar con los elementos adecuados y bien calibrados para garantizar una segura recolección y transporte de los datos a fin de que estos sirvan para el control del cuidado de la salud; esto conlleva a plantear algunas preguntas de investigación que guiaron el rumbo de este estudio ¿La información que se genera en la asistencia médica al personal de la PUCESE, es integra y confiable?, ¿La información generada en la asistencia médica es utilizada como historial para tratamiento futuros? ¿Los dispositivos utilizados en las consultas para obtener información como peso, presión arterial, estatura permiten transferir directamente la información a una base de datos? ¿La información esta digitalizada?, ¿Existe un sistema de red de datos que garantice el acceso a la información de forma rápida y oportuna?

Justificación

A pesar de los avances tecnológicos, la cantidad y proporción de trabajadores que todavía hacen trabajos intensos, penosos y pesados es elevada incluso en un ambiente laborar como el educativo, ya que por la exigencia de la academia o la autoexigencia del personal comprometidas con la excelencia de su trabajo, hay individuos que trabajan más horas de los que recomiendan los buenos hábitos de salud llegando a naturalizar y aceptar ese ritmo de trabajo como si fuera algo inherente a su trabajo y, subestiman el impacto sobre su salud.

La utilización de la fuerza de trabajo que se hace en determinadas condiciones y medio ambiente de trabajo (CyMAT) en ocasiones crea una carga de trabajo que termina generando fatiga y riesgos físicos, psíquicos y mentales que adquieren diferentes relevancias según su intensidad y la duración del tiempo de exposición, de acuerdo con el sector y la actividad donde se producen.

El riesgo psicosocial en el trabajo (RPST), puede detectarse cuando en la institución se observa caídas de productividad u obstáculos para aumentar las dificultades para el cumplimiento de los plazos de entrega, desmejoramiento de la calidad y desánimo entre los trabajadores, por ejemplo, rechazo a la posibilidad de hacer horas extraordinarias para responder a incrementos de la demanda, así mismo son indicadores el aumento de quejas de

los clientes y usuarios por la baja calidad e atención, conflictos en las relaciones interpersonales dentro de la empresa u organización originados por problemas de organización de trabajo.

En ocasiones la frecuencia con la que los trabajadores se realizan chequeos médicos no es suficiente para garantizar el cuidado de la salud, ya sea por descuido del mismo paciente el cual por las exigencias laborales y los compromisos económicos no mantiene un ritmo recomendado de citas médica o muchas veces por no encontrar disponibilidad de atención en los periodos que tiene libre para hacerse los chequeos.

Al disponer de dispositivos IoMT, que puedan ayudarle a llevar el control de su estado de salud y a más de eso ayudarles a prevenir situaciones que afecten su salud, censando, analizando e informando de una forma permanente la institución está garantizando el trabajo y la salud de sus empleados y por ende su productividad.

Objetivos

General

Describir la infraestructura IoT-LoRa adecuada para la captura, transmisión, almacenamiento y procesamiento de datos médicos a utilizarse en los centros de cuidado de la salud de la PUCESE, utilizando el simulador de eventos discretos OMNET++ y el framework FLoRa.

Específicos

a) Determinar la situación actual de los centros médicos de la PUCESE con relación a la adquisición, administración y almacenamiento de la información.
b) Analizar las bases teóricas sobre los dispositivos IoT y comunicación de datos principalmente de la tecnología actual wifi y LoRa.
c) Realizar una implementación de la red LoRa mediante la simulación y despliegues experimentales en OMNeT++ utilizando el Framework FLoRa.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1 Bases conceptuales

En esta sección se presentan las bases conceptuales para el estudio y análisis de la arquitectura IoT y la arquitectura para IoMT. Se aborda el concepto de la arquitectura IoT y sus capas, se comparan las tecnologías inalámbricas utilizadas en IoT, se explican las topologías de red y se mencionan herramientas para el simulador de red. Se profundiza en el simulador de eventos discreto OMNET++, explicando su utilidad en la simulación de redes IoT, y se introduce la tecnología inalámbrica LoRa, así como también se menciona el marco de software FLoRa, que permite realizar simulaciones de redes de largo alcance basadas en LoRa. Con estas bases conceptuales, se sentarán las bases para el desarrollo del estudio y análisis de la arquitectura IoT e IoMT en la siguiente sección.

1.1.1 Arquitectura IoT

IoT se la define como una combinación de tecnología conformando un conjunto de capas, con la capacidad de conectar un gran número de objetos a través del internet, el funcionamiento del IoT necesita de una arquitectura en capas que sea flexible por naturaleza para soportar el incremento de objetos conectados y con ellos el aumento de tráfico de datos. Una arquitectura básica de IoT comienza con 3 capas que integra: una capa de percepción, una capa de red y una capa de aplicación [4].

- La capa de percepción es similar a la capa física del modelo OSI, esta capa está compuesta por elementos de hardware los cuales tienen la facultad de recolectar información del mundo físico y esa información recolectadas la transfiere a la siguiente capa; esta capa está compuesta con tecnología como sensores, RFID y equipos de codificación en 2 dimensiones que capturan información como: temperatura, peso, vibraciones, niveles de pH, humedad, cantidad de polvo en el aire, etc.; toda esta información es digitalizada y transferida utilizando canales seguros.
- La capa de red es la responsable de transferir la información de la capa de objetos a la capa superior utilizando canales seguros. Los datos pueden ser transportados al sistema de procesamiento central utilizando tecnología como ZigBee, Z-wire, 3G, GSM, UMTS, WiFi, infrared, 6LoWPAN, etc; pero esta capa puede realizar además otras tareas como el tratamiento de los datos [4].

- La capa de aplicación es la que maneja todas las aplicaciones y servicios de IoT y provee un alto nivel de análisis para generar reportes, esta es la capa que ayuda al usuario a tomar decisiones sobre la información recabada. Esta y todas las capas se ven ilustradas en la **Figura 1**.

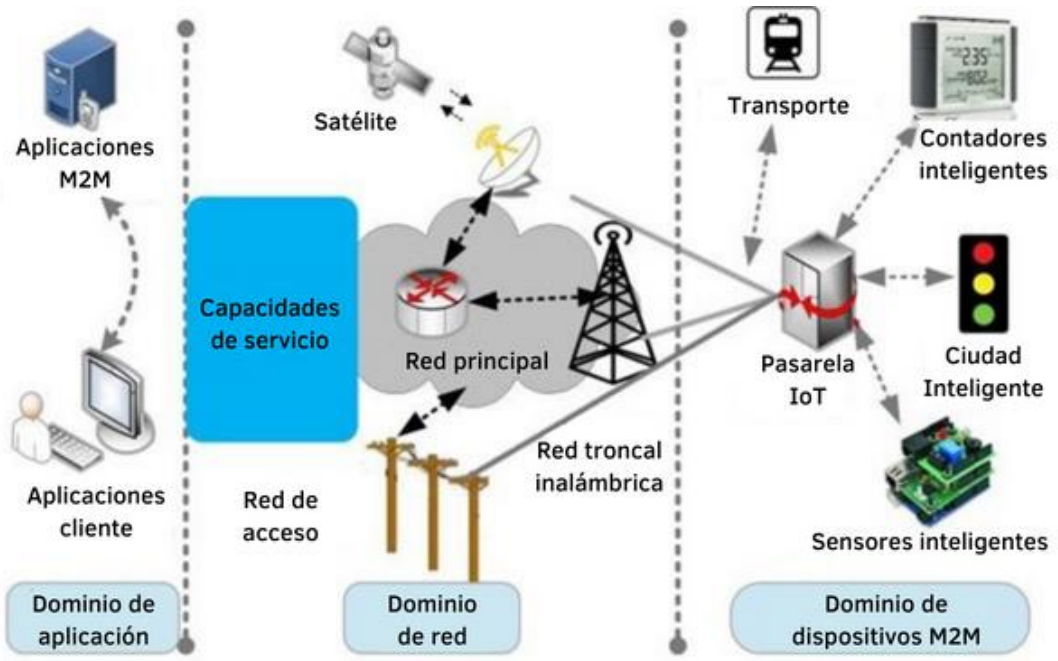


Figura 1 *Capas que constituyen la arquitectura de alto nivel para IoT* [5].

Capas en la arquitectura IoT

La arquitectura de 3 capas define la idea principal del internet de las cosas, pero esto no es suficiente para las investigaciones en IoT porque las investigaciones siempre se enfocan en aspecto más detallados del Internet de las Cosas, en un estudio más profundo se tiene que tomar en cuenta una arquitectura más real como es la de 7 capas como se muestra en la **Figura 2**.

Cuando se trata el IoT como una arquitectura de 3 capas es porque se le da poca importancia a la naturaleza de los datos generados por los dispositivos IoT, así como también a procesamiento de ellos. Pero hay que considerar que en muchos sistemas el procesamiento de datos es realizado utilizando complejos algoritmos que se ejecutan en centrales de procesamiento en la nube, la computación en la nube hace referencia a un conjunto de servicios como la infraestructura de cómputo base, plataforma, software y almacenamiento.



Figura 2 *Modelo de 7 capas una arquitectura real del IoT.*

Arquitectura para IoMT

La arquitectura IoT aplicada al cuidado de la salud (**Figura 3**) permite analizar y comunicar en tiempo real información de carácter médico, controlados por la nube donde se almacena y analiza gran cantidad de datos [6]. Un caso muy común son los pacientes con problemas de diabetes los cuales es necesario monitorear el nivel de su azúcar con bastante frecuencia, algo que en ocasiones es difícil porque son personas que están en gran actividad, es aquí donde el uso de las IoT se hace necesario; de hecho, ya existen trabajos avanzados para crear sistemas con arquitectura que provean un monitoreo continuo de la glucosa de una persona en tiempo real, local y remotamente [7].

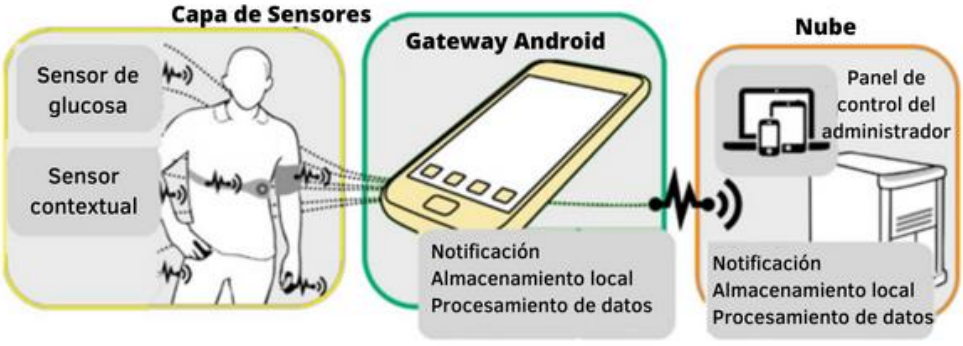


Figura 3 *Ejemplo de arquitectura IoT aplicado a la salud IoMT.*

Una de las preocupaciones en el manejo de información en este campo es la seguridad. En esta línea, investigadores como Mustafa, Rosilah y Khairul [8] han brindado su contribución proponiendo mecanismos de autentificación confiable utilizando algoritmos de tipo CoAP y ECC. Tekeste, et al. [9] ya hacen referencia a varias de las aplicaciones que IoT tiene en el cuidado de la salud entre estos censar los niveles de glucosa en paciente que sufren de diabetes, electrocardiograma del registro de las actividades del corazón, el monitoreo de la presión de la sangre, el monitoreo de la saturación de oxígeno en la sangre; además de los componentes tecnológicos que se necesitan utilizar en un sistema para que IoT funcione; estos autores abordan la restricción en cuanto al consumo de energía de IoT para los dispositivo de salud, llegando a recomendar que radio frecuencia es una clave para el ahorro de energía en los dispositivo IoT para la salud en vez de la tecnología Wifi o Bluetooth, al menos en diseños pequeños. En los últimos años se está utilizando una nueva tecnología de comunicación llamada LoRa, la cual fue utilizada por Norbahian y otros investigadores para fabricar sensores de monitoreo de saturación de oxígeno obtenido buenos resultados por la gran distancia que alcanza (15 km) [10].

Es importante destacar que estos dispositivos se han vuelto cada vez más populares en los últimos años gracias a su accesibilidad y facilidad de uso, lo que ha permitido a las personas monitorear su salud de manera más conveniente desde la comodidad de sus hogares. Además, el avance tecnológico ha permitido el desarrollo de dispositivos más precisos y sofisticados que pueden proporcionar una mayor cantidad de información sobre el estado de salud de una persona como muestra la **Figura 4**.

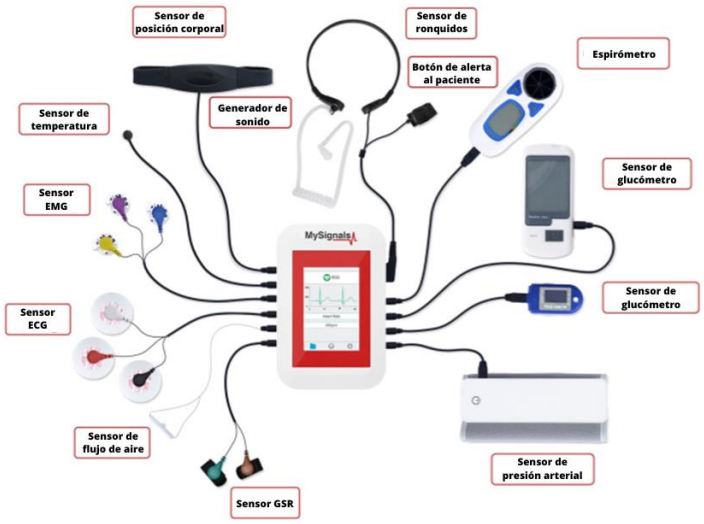


Figura 4 *Un dispositivo comercial para censar varias funciones del cuerpo humano.*

1.1.2. Tecnologías inalámbricas

Comparación de tecnologías inalámbricas

La índole adaptable y fiable inherente al protocolo de internet (IP) lo convierte en un medio aceptable para la transmisión procesal entre módulos del IoT. La arquitectura del sistema (por entre la que deben viajar los datos) determina el tipo del protocolo de IoT. El modelo de interconexión de sistemas abierta (OSI) ofrece un mapa de las diferentes capas que despachan y aceptan datos. Cada protocolo en la arquitectura del sistema del IoT hace posible las comunicaciones entre dispositivos, de dispositivo a gateway, de gateway a centro de datos, de gateway a nube y entre centros de datos. La **Tabla 1** muestra las opciones de tecnologías inalámbricas que se pueden utilizar, siendo LoRa la tecnología que permite transmitir un rango más amplio a un menor costo energético gracias a la frecuencia de transmisión relativamente baja comparada con las demás.

Tabla 1 *Tecnologías inalámbricas de baja frecuencia.*

Redes	**Topología**	**Radio frecuencia**	**Razón de datos**	**Rango**
BLE	Adhoc	2.4 GHz	1 – 2 Mb/s	10m
ZigBee	Mesh	868.3 MHz	0.02 – 0.25 Mb/s	100 m
Wi-Fi	Star	2.4 GHz	11 Mb/s – 10 Gb/s	< 1km (MSC10, 1MHz)
SigFox	Star	862 – 928 MHz	100-600bps	10km
LoRa	Star	860 – 1024 MHz	290bps – 50 kbps	15km

LoRa: red inalámbrica de largo alcance y bajo consumo de energía

LoRa es una capa física que brinda un amplio rango de comunicación entre dispositivos de bajo consumo de energía utilizando medios inalámbricos para transmitir la información a un servidor central, esto ha sido logrado sumando una capa MAC (Control de Acceso al Medio) cuya especificación se las conoce como LoRaWAN y es un código abierto mantenido por la Alianza LoRa [11] [12].

1.1.3 Topologías de red

La arquitectura IoT descrita anteriormente se basa en la comunicación entre diferentes dispositivos, la cual se realiza a través de diferentes topologías de redes inalámbricas, la selección de una topología con un eficiente sistema de control es importante para la transmisión

de la información, sobre todo cuando la población de los dispositivos conectadas es densa [13]. Las topologías más utilizadas son la ad-hoc, la estrella y la mesh, las cuales se describen a continuación.

Topología ad hoc

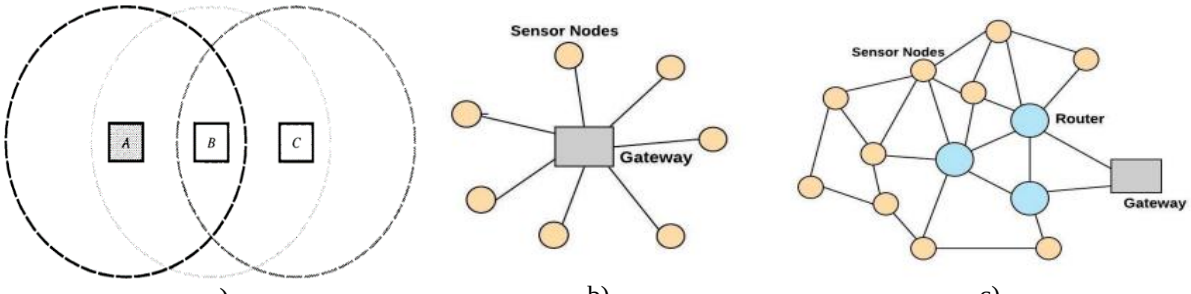
Una de las más antiguas tecnología inalámbrica es BLE, la cual se la aplica utilizando una tipología Ad hoc, en esta topología todos los dispositivos están conectados uno con otro en una simple red punto a punto y cada dispositivo accede directamente a otro sin un servidor o router, como se visualiza en la **Figura 5** literal a), por lo que cada dispositivo es responsable de su propia seguridad y nivel de acceso.

Topología Estrella (star)

Las tecnologías WiFi, SigFox y LoRa, funcionan con la topología estrella (star topology) como se observa en la **Figura 5** literal b). En esta topología los nodos están conectados a un único nodo el cual puede ser llamado como un nodo central que trabaja igual a un PAN (Personnel Area Network) [14].

Topología Mesh

La tecnología inalámbrica ZigBee que utiliza la topología Mesh, esta topología muy parecida a la anterior, en su versión inalámbrica es una red descentralizada con salida hacia una administrador centralizado o servidor no centralizado es cual es costoso. Como se puede ver en la **Figura 5** literal (c, la información se transmite de nodo a nodo y cada nodo actúa como ruteador para transmitir los datos a su destino [14].



a) b) c)

Figura 5 *a) Topología ad-hoc b) Topología estrella c) Topología mesh* [15].

1.1.4. Herramientas para simulador de red

La simulación es una importante tecnología moderna que puede ser aplicada en variedad de áreas como las ciencias, ingenierías y muchas más para diferentes propósitos; las simulaciones asistidas por computadora pueden modelar objetos o actividad reales o no reales con la finalidad de estudiar su funcionamiento dentro de un sistema [16]. Actualmente, hay muchos simuladores de red que tiene diferentes características en diferentes aspectos tal como se muestra en la **Tabla 2**. Algunos de los que se utilizan más frecuentes son OPNET, NS-2, NS-3, OMNeT++, REAL, SSFNet, J-Sim y QualNet.

Tabla 2 *Comparación entre herramientas de simulación de red* [16].

Característica	**NS2**	**NS3**	**JSIM**	**OMNet++**	**OPNET**	**QualNet**
Lenguaje soportado	C++/OTCL	C++, Python	Java, Tel	C++	C(C++)	Parsec C++
Soporte GUI	Malo	Bueno	Bueno	Bueno	Excelente	Excelente
Tiempo de aprendizaje	Largo	Moderado	Moderado	Moderado	Largo	Muy fácil
Tiempo para descargar e instalar	Moderado	Largo	Facil	Muy fácil	Moderado	Fácil
Plataformas	Linux, unix, Windows, Cygwin	Linux, unix, Windows	Windows, Linux, Matlab.	Linux, unix, Windows, MAC OS	Linux, solaris, windows	Linux, DOS, Windows.
Herramienta para visualizar la red	Si soporta	Si soporta	Si soporta	Si soporta	Si soporta	Si soporta

En estudios de simulaciones se ha demostrado que OMNET++ es mucho más escalable que NS2 [17] que es uno de los más avanzados simuladores de redes usados en el mercado, además este simulador según la **Tabla 2** tiene una curva de aprendizaje menos pronunciada lo que lo convierte en una herramienta ideal para los trabajos de investigación previo a la creación real de las soluciones.

Simulador de eventos discreto OMNET++

Este simulador de red está basado en componentes llamados módulos programados en C++, utiliza interfaz gráfica de usuario (GUI) y se especializa principalmente en la simulación de

redes de comunicación, aunque por contar con una arquitectura flexible se la puede utilizar para otras áreas en sistemas de tecnología de la información, colas de redes, arquitectura de hardware, e incluso también para procesos de negocios. En la simulación de redes de comunicación, una de las funciones más importantes es la de los dispositivos gateway, los cuales permiten que los datos fluyan de un lado de la compuerta al otro sin perder conexión entre el dispositivo y el servidor destino. Esto es posible gracias a un diseño lógico, como se muestra en la **Figura 6**.

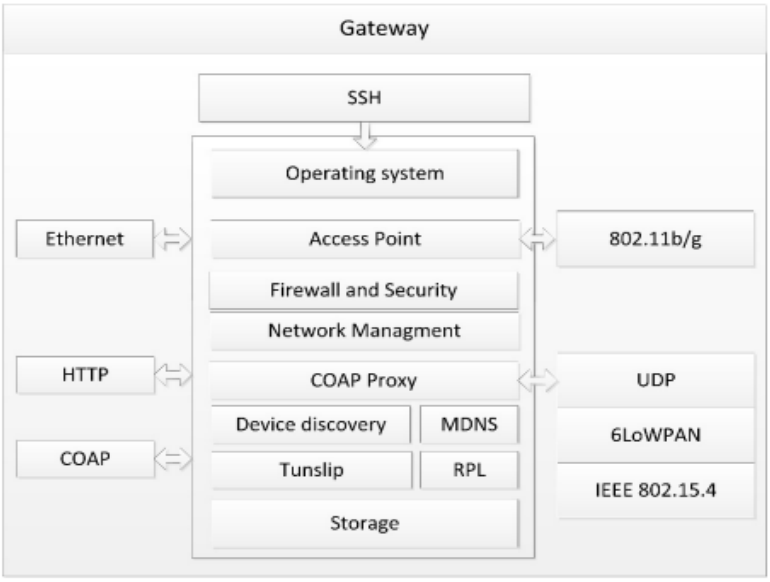


Figura 6 *Módulo gateway simulado en OMNET++ junto a todos sus atributos y eventos.*

Como se observa en la **Figura 7** los dispositivos inalámbricos (wireless) se conectan utilizando las interfaces 802.11(Wi-Fi) así como la interfaz 802.15.4 (6LoWPAN mesh). Que incluye la compuerta gateway que ilustra la **Figura 6**; la compuerta (gateway) es utilizada para recibir los datos que provienen de dispositivos como laptops, tables, y teléfonos inteligentes (smarthphone), y luego transferirlo a través de una red de área local a un servidor. La interfaz 802.15.4 (6LoWPAN mesh) es utilizada para connect sensores y actuadores de bajo poder (dispositivos operados por batería). En este entorno la compuerta (gateway) es la verdadera responsable de componer y descomponer el extenso paquete IPv6 a una versión más corta llamada 6LoWPAN y viceversa [18].

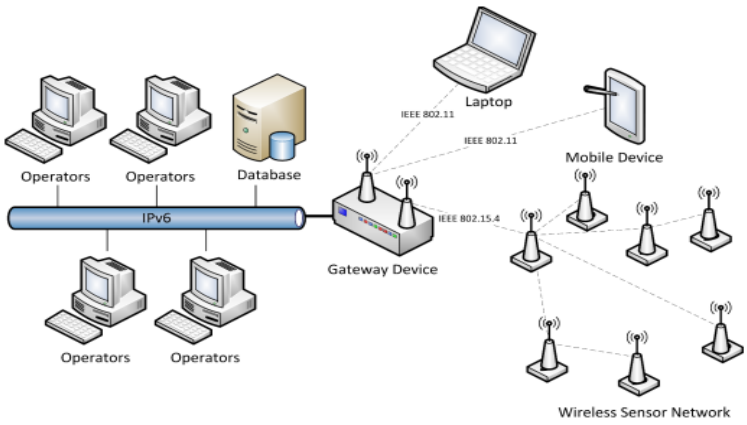


Figura 7 *Modelo de interacción entre gateway y diferentes topologías de red.*

FLoRa

Una infraestructura IoT dentro de áreas metropolitanas y urbanas demanda un amplio rango de comunicación de tipo inalámbrica, la topología LoRa está demostrando ser una tecnología prometedora por ser simple y muy flexible para implementarse en escenarios muy densos logrando a pesar de todo una comunicación eficiente entre un gran número de dispositivos conectados a lo largo de una gran cantidad de construcciones que puede ser un factor negativo para la comunicación [19].

A pesar de que OMNeT++ es un simulador de eventos discreto que permite simular cualquier arquitectura de red de datos u otras más, fue necesario incluir módulos que simulen la capa física de LoRa, el protocolo LoRaWAN MAC, así como puertos (gateway), elementos de red, servidor de red y hasta el bajo consumo de energía de LoRa

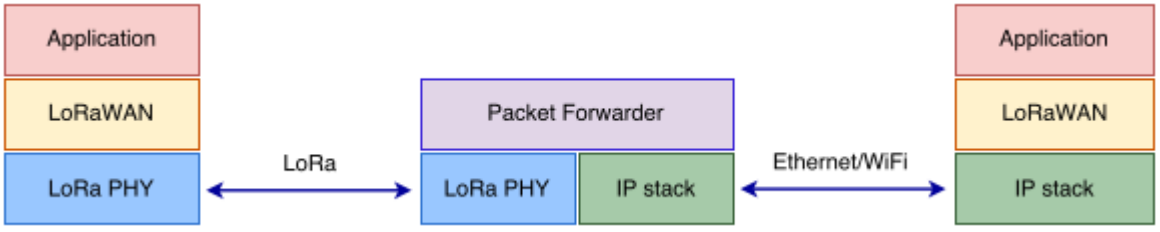


Figura 8 *Funcionamiento de un gateway LoRa para comunicar dos protocolos de red distintos* [19].

1.2. Antecedentes

Para la recopilación de antecedentes se tomaron en cuanta dos criterios, primero investigaciones en la línea de la salud y después otras en la línea de la simulación de redes basadas en LoRa.

El objetivo principal de Petäjäjärvi, et al. [21] en su investigación titulada “Evaluation of LoRa LPWAN Technology for Indoor Remote Health and Wellbeing Monitoring” es el de establecer los requerimientos de red para el área de salud, por tal motivo estudiaron el rendimiento en interiores de una tecnología LPWAN, concretamente LoRa, mediante mediciones reales, con el fin de investigar la idoneidad de la tecnología LoRa LPWAN para monitorización de la salud y bienestar. Su metodología consistía en realizar mediciones con un nodo sensor que operaba cerca del cuerpo humano y que mantenía una comunicación periódica de los datos detectados con una estación base.

Los resultados obtenidos mostraron que cuando se utiliza una potencia de transmisión de 14 dBm y el mayor factor de dispersión de 12 para la banda ISM de 868 MHz, se puede cubrir toda la zona del campus. Se comprobó que en los lugares donde se hicieron las pruebas, más del 96% de los paquetes enviados por los dispositivos fueron recibidos exitosamente por la estación base.

De todo esto se desprende que la tecnología LoRa de LPWAN es una tecnología muy adecuada para la monitorización de los pacientes, la monitorización del bienestar, así como el monitoreo de la salud y la seguridad.

En el estudio de Fotouhi, et al. [22], llamado “Enabling time-critical communications in medical IoT applications”, el objetivo es establecer una comunicación eficiente para las aplicaciones de tiempo crítico, debido a que las nuevas aplicaciones de tiempo crítico requieren una latencia extremadamente baja, además de una alta fiabilidad y garantías de seguridad.

Se realizó una cuidadosa elección de tecnología de conectividad que conlleven a tener fiabilidad y seguridad entre un paciente y un proveedor de atención sanitaria. Este tipo de tecnología se divide en dos tipos la alámbrica y la inalámbrica, cada una con sus respectivas ventajas. La primera tecnología tiene una ventaja en cuanto a seguridad se refiere, y además puede ser usada de manera combinada con las tecnologías inalámbricas para conectar sensores y dispositivos finales a nivel del IoT. Por otra parte, la segunda tecnología la de tipo inalámbrica ofrece un nivel de flexibilidad sin antecedentes para el diseño de sistemas y las actualizaciones de legado.

En sus resultados pudieron demostrar que se requiere una latencia extremadamente baja, una alta fiabilidad, además de garantías de seguridad. El problema de todo esto es que se exige una identificación detallada de la calidad de servicio (QoS), la que es requerida para aplicaciones de tiempo crítico.

Slabicki, M. et al. [19], en la investigación titulada “Adaptive configuration of lora networks for dense IoT deployments” se planteó como objetivo la implementación y

evaluación de una red LoRa con parámetros escalables para una eficiente operación, utilizando el framework de código abierto llamado FLoRa, sobre el simulador OMNET++. Esta implementación se produjo debido a la limitación de recursos energéticos y la necesidad de garantizar una transmisión de datos eficiente y confiable.

Se implementó una red LoRa en un entorno urbano denso y se realizaron pruebas de configuración adaptativa para determinar la configuración óptima de la red. La configuración adaptativa de la red LoRa con una combinación de diferentes factores de dispersión y ancho de banda permitió una transmisión de datos de alta calidad y un bajo consumo de energía en entornos densos de IoT, así como una escalabilidad de la red.

La configuración adaptativa de la red LoRa es una solución eficaz para IoT en entornos urbanos densos, mejorando la transmisión de datos y prolongando la vida útil de los dispositivos. Esto tiene potencial para mejorar la calidad y eficiencia en aplicaciones de monitoreo y control.

Por su parte, Jung y Yoo [20], en su investigación titulada como "GRU-based Adaptive Data Rate Control Algorithm Considering the Mobility of LoRa Devices", tenían como objetivo resolver el problema de movilidad de los dispositivos móviles. La red de área amplia de largo alcance (LoRaWAN) es una tecnología de red para el IoT de largo alcance y tiene una baja potencia, larga distancia y baja velocidad, además es compatible con la tecnología de tasa de datos adaptativa (ADR), pero esto no lo hace compatible con dispositivos móviles.

Por eso hicieron uso de OMNeT++ y el Framework for LoRa (FLoRa). Puesto que los dispositivos LoRa son compatibles con la tecnología de tasa de datos adaptativa (ADR), con el fin de ahorrar energía de transmisión. Esta compatibilidad se logra gracias a que un servidor utiliza algoritmos para reducir el consumo de energía minimizando el tiempo que los paquetes de LoRa Radio, para lograr aumentar la velocidad de datos o también ajustar la potencia de transmisión y evitar de esta manera el ruido (NRC).

Sin embargo, el algoritmo ADR actualmente utilizado en el servidor de red determina la velocidad de transmisión de datos y la potencia de transmisión necesarias basándose en el valor máximo de SNR de los últimos 20 paquetes recibidos. Este enfoque no es adecuado para dispositivos móviles, ya que los valores de SNR de estos dispositivos cambian constantemente debido a su movimiento y velocidad. Los resultados obtenidos en este estudio fueron la creación de un ADR mejorado, llamado GRU-ADR. Con el uso de OMNeT++ y FLoRa se demostró que de acuerdo con lo visto en [20]: "esta tecnología mejorada supera al ADR existente en relación de entrega de paquetes (PDR) y consumo de energía, que infiere los valores SNR futuros utilizando el modelo de unidad recurrente cerrada (GRU) de aprendizaje

profundo". Y de esta manera se habilita su uso en dispositivos móviles, mejorando mucho el rendimiento de éstos. Un campo de estudio que se beneficia altamente de esto es el de la medicina, porque necesitan tener fiabilidad en la comunicación de sus dispositivos móviles. En general, se espera que los dispositivos médicos tengan una alta precisión y un alto nivel de confiabilidad en la medición de los parámetros de salud, con un porcentaje de fiabilidad que puede variar desde el 95% hasta el 99% o más, dependiendo del tipo de parámetro y la aplicación médica específica.

Por último, Bouras, C. et al. [23] en su investigación "Comparison of LoRa Simulation Environments" tienen como objetivo demostrar la validez de la simulación de una red LoRa utilizando varios entornos y módulos como FLoRa, Ns-3 module y LoRaSim. Este estudio es importante porque la simulación debe contemplar la calidad de servicio (QoS), la cobertura, rango, vida de batería y la eficiencia de costos a fin de representar de forma precisa la situación real. La metodología que se empleó fue la de comparar características de varios simuladores, como el sistema operativo que usa, el tipo de licencia, la GUI. Además, se hizo referencia a la documentación donde se encontró que OMNET++ tiene una comunidad fuerte de usuarios. Como conclusión en esta investigación, se establece que LoRa es la solución ideal para la comunicación IoT en rangos muy amplios y que permitió configurar de forma correcta variables como el SF, para mantener un consumo de energía aceptable en los dispositivos, tener una gran cobertura y una buena QoS.

1.3 Fundamentación legal

Esta investigación está enmarcada en el Plan Nacional de Desarrollo 2021, 2025 donde en los objetivos del Eje Social, el objetivo 6 dice Garantizar el derecho a la salud integral, gratuita y de calidad. Según la Ley Orgánica de Salud en su artículo 42 de la Constitución Política de la República, dispone que "El estado garantizará el derecho a la salud, su promoción y protección, por medio del desarrollo de la seguridad alimentaria, la provisión de agua potable y saneamiento básico [24], pero además la Ley Orgánica de Salud en su última reforma del 29-04-2022, expresa la importancia de las universidades en el desarrollo de actividad para el cuidado de la salud, eso se da a entender en el Capítulo I: DE LAS AUTORIZACIONES, Artículo 138, donde dice, "Los análisis de calidad del control posterior, deberán ser elaborados por la autoridad competente de la autoridad sanitaria nacional, y por laboratorios, universidades y escuelas politécnicas, previamente acreditados por el organismo competente" [25]. Mediante acuerdo ministerial No 015-2019, publicado en el Registro Oficial 69 de 28 de octubre de 2019,

se aprobó la Política Ecuador Digital cuyo objetivo “es transformar al país hacia una economía basada en tecnologías digitales, mediante la disminución de la brecha digital, el desarrollo de la Sociedad de la Información y del Conocimiento, el Gobierno Digital, la eficiencia de la administración pública y la adopción digital en los sectores sociales y económicos” [26].

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1 Delimitación espacio/temporal

La investigación se realizó en la provincia de Esmeraldas en los dos campus de la PUCESE, el primero ubicado en la parroquia Tachina y el segundo en la parroquia Esmeraldas (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. **y Figura 10**). Durante los meses de diciembre 2022 y marzo 2023.

2.2 Tipo de investigación

La investigación fue de tipo mixta, en la parte cualitativa se describió los elementos que constituirán la infraestructura IoMT-LoRa para utilizarla en las dos ubicaciones de la PUCESE, en la parte cuantitativa se estableció los rangos máximos y mínimos de los parámetro para lograr un funcionamiento óptimo de los elementos que conforman la red; fue necesario una investigación de tipo exploratoria por que se analizó varias de las alternativas existentes y después de encontrar las que se ajusten a lo solución propuesta se describió su funcionamiento y estructura; los resultado fueron presentados resaltando las cualidades de la infraestructura y de forma cuantitativa tabulando los elementos con sus parámetros de configuración; también se utilizó la investigación explicativa para poder redactar las conclusiones y recomendaciones.

2.3 Métodos de investigación

En esta investigación se empleó el método deductivo enfocándose en estudiar LoRa y sus áreas de aplicación para luego contextualizarlo en aspectos de la salud como lo son los dispositivos IoMT. También se empleó método experimental donde se utilizó ambientes virtuales de simulación para encontrar los efectos de manipular el factor de dispersión (SF) sobre el consumo de energía y el tiempo en el aire (ToA). Finalmente, el método descriptivo permitió dar a conocer los resultados obtenidos en la investigación.

2.4 Técnicas de investigación

La técnica empleada fue la experimentación, se utilizó un simulador de eventos discretos para representar la solución real del problema.

2.5 Operacionalización de variables

La variable independiente es: **Factor de dispersión** (SF) y las variables dependientes: Consumo de energía y Tiempo en el aire (ToA). Las tres variables se describen en la **Tabla 3**.

Tabla 3 *Variables en indicadores sujetos a investigación.*

Variables	Descripción	Dimensiones	Descripción	Indicador	Tipo
Factor de dispersión (SF)	Mide la variabilidad de un conjunto de datos en relación con una medida de tendencia central y se utiliza para comparar la variabilidad entre diferentes conjuntos de datos.	Variación de dispersión	Alto SF mayor consumo de energía, bajo SF menor consumo de energía	SF	Cuantitativa
Consumo de energía	Cantidad de energía que necesita un dispositivo para transmitir información.	Energía	Cantidad de energía consumida por cada dispositivo IoT en la red LoRa al transmitir información.	mj	Cualitativa
Tiempo en el aire (ToA)	El tiempo en el aire (ToA) es el tiempo que tarda una señal en viajar a través de un medio inalámbrico desde un dispositivo emisor hasta un dispositivo receptor.	Tiempo	Tiempo que tarda en transmitir de un dispositivo IoT de la red LoRa hasta el gateway.	milisegundos	Cuantitativa

2.6 Técnicas de procesamiento de datos

Se uso la técnica de análisis estadístico, específicamente la estadística descriptiva para mostrar la distribución de los nodos en diferentes factores de dispersión. Además, se mostró el consumo de energía de cada nodo según el grupo asignado de SF. También se empleó la técnica de visualización de datos con la creación de gráficos de barras y lineales.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1 Modelo de simulación

El modelo de simulación LoRa se utilizó para evaluar el rendimiento de una red de sensores médicos inalámbricos de larga distancia en la ciudad de Esmeraldas, específicamente en el campus de la PUCESE. El objetivo estuvo enmarcado en analizar la cobertura de la red, la tasa de transmisión de datos y el consumo de energía de los nodos.

El modelo se desarrolló utilizando el software de simulación de eventos discretos OMNET++ junto con el módulo FLoRa, que es un Framework que permite la creación de una red LoRa, es decir, implementa módulos para nodos LoRa, además de gateway y servidores de red como se ve en la **Figura 9**.

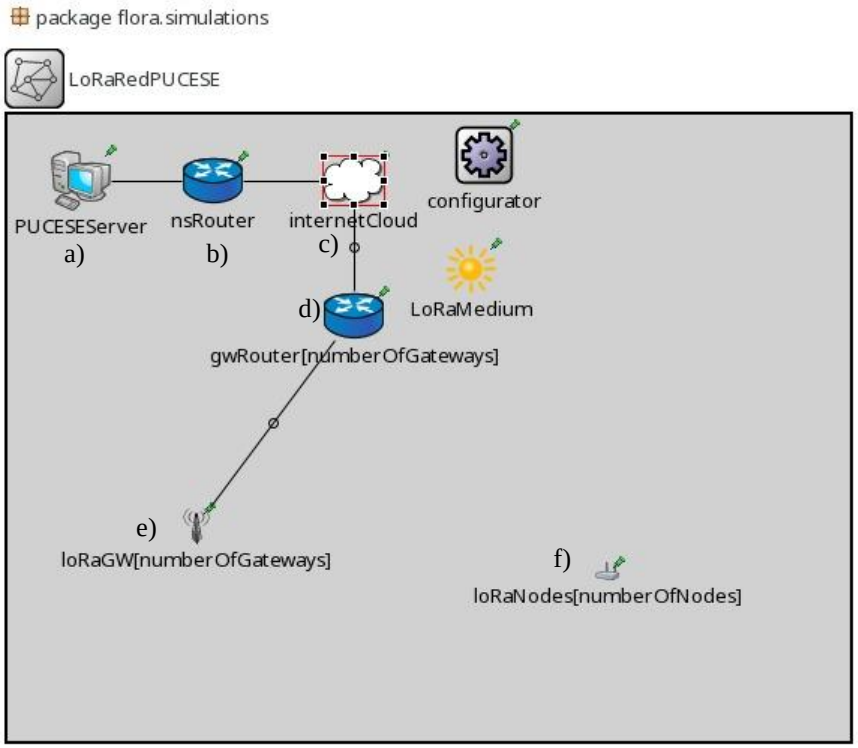


Figura 9 *Modelo de simulación.*

El modelo de simulación estuvo compuesto por seis elementos tal como se representan en la **Figura 9**. El elemento **a)** es el servidor de la red LoRa, la función principal de un servidor en una red LoRa es actuar como un punto de acceso centralizado para recibir, procesar y almacenar los datos enviados por los dispositivos finales o nodos de la red. El elemento **b)** es el nsRouter (Network Server Router), se encarga de enrutar

los paquetes de datos que son enviados por los nodos de la red hacia el servidor de red (elemento **a**). Pero antes de realizar este proceso, los datos pasaron por el servidor en la nube (elemento **c**) que contiene la tabla de direcciones para poder direccionar la información al servidor que desee, en este caso al servidor de la PUCESE.

Luego está el gwRouter o en inglés Gateway Router (elemento **d**), que se ocupa de enrutar los paquetes de datos que son recibidos por los LoRaGW (elemento **e**) hacia el servidor en la nube. Un LoRaGW (LoRa Gateway) es un dispositivo que se encarga de recibir los paquetes de datos enviados por los dispositivos LoRaNodes de la red (elemento **f**) y de reenviarlos a través de una conexión de red (por ejemplo, Internet) hacia el servidor de red correspondiente.

Para este modelo de simulación se configuraron los parámetros siguientes:

- **La frecuencia de transporte** de 868 MHz, esta frecuencia se utiliza para la transmisión de datos a través del aire entre los dispositivos finales o nodos de la red y los gateways.
- El **ancho de banda** 125 KHz, se aplica para optimizar la sensibilidad y el alcance de la señal, lo que significa que los datos pueden ser transmitidos a mayores distancias con una mayor calidad de señal.
- La **razón de código** con un valor de 4/8, se refiere a la relación entre la cantidad de bits de datos transmitidos y la cantidad de chips utilizados en la modulación LoRa.
- **Factor de dispersión** (SF) con un rango de 7 a 12 se refiere a la configuración que determina la duración de la señal y la tasa de transferencia de datos en la transmisión de radio LoRa
- **Poder de transmisión** de 2dBm a 14 dBm, se refiere a la cantidad de energía de radiofrecuencia que se utiliza para enviar una señal de radio en una red LoRa. El poder de transmisión se mide en decibelios (dBm).

La simulación se realizó en un área de 73556.384 km^2 con 100 nodos distribuidos aleatoriamente. Tanto el servidor como el gateway que transfiere la información a la nube se encuentra en el campus Esmeraldas y el gateway LoRa se localiza en el campus Tachina, entre estos dos puntos según Google Map existe una distancia de 4.83 Km Sus ubicaciones exactas se establecen en la **Tabla 4** y **Figura 10**.

Los resultados de la simulación mostraron que la cobertura de la red varió significativamente en función de los parámetros de configuración. El aumento de SF

mejoró la cobertura, pero redujo la tasa de transmisión de datos y aumentó el consumo de energía de los nodos.

Tabla 4 *Ubicación de los dos campus de la PUCESE*

Número	Nombre de la Ubicación	Latitud	Longitud
1	Campus Tachina	0.95262	-79.61785
2	Campus Esmeraldas(servidor)	0.97124	-79.95676



Figura 10 *Distancia entre los dos puntos de la PUCESE.*

3.2. Evaluación y análisis de resultados

3.2.1 Escenarios

En esta investigación se consideraron dos escenarios con la finalidad de examinar el efecto que causa la manipulación del factor de dispersión (SF) sobre el consumo de energía y el tiempo en el aire (ToA). En esta evaluación se manejó un total de 100 nodos y se configuró la red para trabajar con un ancho de banda de 125 KhZ, con una variación de SF de entre 7 y 12.

Escenario 1: El consumo de energía

Después de implementarse la red LoRa con éxito, se realizó una evaluación del impacto del factor de dispersión (SF) en el consumo de energía de los dispositivos de la red. El objetivo fue determinar cómo el SF afectaba el consumo de energía de los dispositivos de la red y encontrar un equilibrio entre la calidad de transmisión de datos y el consumo de

energía de los nodos de la red para prolongar su vida útil y garantizar una operación eficiente. Los resultados de esta evaluación se presentan a continuación.

En el contexto de las redes de sensores inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés), el consumo de energía es un factor crítico que debe ser considerado en el diseño y despliegue de estas redes. En particular, la elección del SF en el protocolo de acceso múltiple por detección de colisiones (CSMA) puede tener una gran influencia en el consumo de energía de los dispositivos de la red.

Para evaluar la influencia del SF en el consumo de energía de los dispositivos de la red, se realizó una simulación en la que se establecieron diferentes niveles de SF y se midió el consumo de energía de los nodos de la red. Primero, se estableció un SF de 7 y se encontró que el consumo de energía fue de 150 mili Julios (mJ), el nivel más bajo de consumo de energía que se puede lograr en la simulación.

Luego se estableció un SF de 8 y se encontró que el consumo de energía fue similar al anterior, sin cambios significativos. Sin embargo, al incrementar el SF a 9, se observó un aumento del consumo de energía al doble, llegando a 300 mJ. Este aumento fue esperado, ya que a medida que se incrementa la distancia entre los nodos (SF), se requiere mayor energía para la transmisión de datos.

Después se estableció un SF de 10 y se encontró un consumo de energía de 350 mJ, un incremento poco significativo en comparación con el escenario anterior. No obstante, al incrementar el SF a 11, se produjo un aumento notorio en el consumo de energía, llegando a 500 mJ. Por último, se estableció un SF de 12 y produjo consumo de energía más elevado, llegando a 720 mJ. La información fue ilustrada en la **Figura 11**.

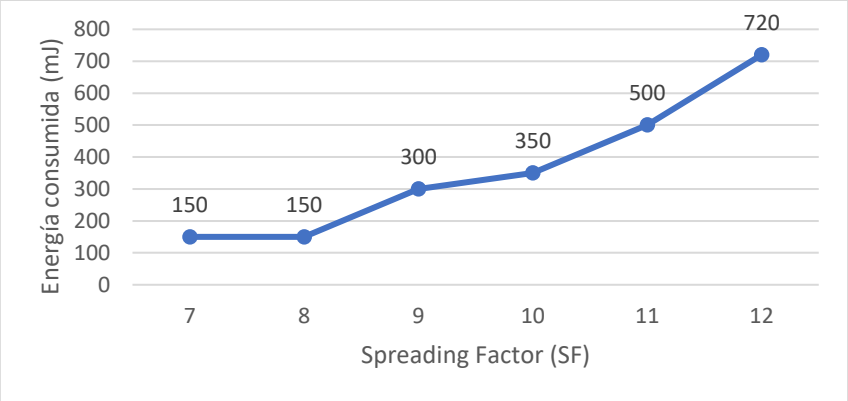


Figura 11 *Energía consumida por nodos en cada SF.*

Estos resultados demuestran la importancia de considerar el SF en el diseño y despliegue de redes de sensores inalámbricos, ya que puede tener una repercusión

relevante en el consumo de energía de los dispositivos de la red. Por lo tanto, es primordial encontrar un equilibrio entre la calidad de la transmisión de datos y el consumo de energía de los nodos de la red, para garantizar una operación eficiente y prolongar la vida útil de la red.

Escenario 2: Tiempo en el aire (ToA)

El factor de dispersión, también conocido como spread factor (SF), es un parámetro importante en las redes LoRa, ya que afecta directamente al tiempo en el aire (ToA) de los paquetes transmitidos. El ToA es el tiempo que tarda un paquete en ser transmitido por un nodo y recibido por otro, y está influenciado por varios factores, como la distancia entre los nodos, la frecuencia de operación y el SF utilizado.

En general, cuanto mayor sea el SF, mayor será el tiempo en el aire necesario para transmitir un paquete de datos, ya que se requiere un mayor número de símbolos para representar la misma cantidad de información. Por lo tanto, un aumento en el SF también se asocia con una disminución en la velocidad de transmisión de datos.

En los valores representados en la **Figura 12**, podemos observar que a medida que aumenta la cantidad de bits en el paquete de datos, también aumenta el tiempo en el aire requerido para transmitirlos. Además, podemos ver que en general, a medida que aumenta el SF, también aumenta el tiempo en el aire necesario para transmitir los paquetes de datos.

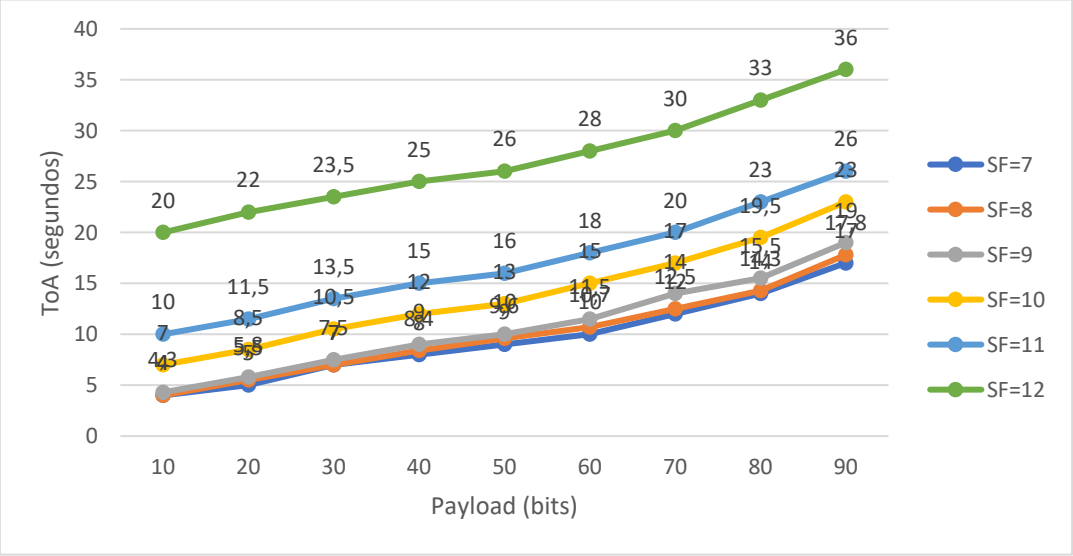


Figura 12 *Energía consumida según el tamaño del Payload.*

En particular, para un SF de 7, con una cantidad de bits de 10, el ToA es de 4 segundos. A medida que se aumenta la cantidad de bits transmitidos, el ToA aumenta gradualmente, alcanzando un valor de 17 segundos para 90 bits transmitidos. En comparación, para SF 12, con una cantidad de bits de 10, el ToA es de 20 segundos y aumenta hasta 36 segundos para 90 bits transmitidos.

Es importante tener en cuenta que el tiempo en el aire puede tener implicaciones significativas en el consumo de energía y la vida útil de las baterías de los dispositivos, así como en la latencia de la red y la capacidad de respuesta. Por lo tanto, es necesario encontrar un equilibrio entre la cantidad de datos transmitidos, el SF utilizado y el consumo de energía para garantizar un rendimiento óptimo de la red LoRa.

3.2.2 Calidad de datos

Esta investigación presenta resultados de una simulación que evaluó el impacto del factor de dispersión (SF) en el consumo de energía y el tiempo en el aire (ToA) de una red LoRa de 100 nodos.

Los resultados del primer escenario (**Figura 11**) indican que, en general, un SF bajo (7 o 8) permitió un consumo de energía más bajo que un SF alto (10, 11 o 12). A medida que el SF aumentaba, el consumo de energía también aumentaba, lo cual era esperado ya que se requiere más energía para transmitir datos a distancias más largas. Sin embargo, los incrementos en el consumo de energía no fueron lineales, y en algunos casos el incremento fue significativamente mayor que en otros.

Estos resultados sugieren que hay un equilibrio que debe ser encontrado entre la calidad de la transmisión de datos y el consumo de energía de los nodos de la red. Por lo tanto, al diseñar y desplegar redes de sensores inalámbricos, es importante considerar cuidadosamente el SF y otros parámetros de transmisión como el tiempo en el aire (ToA) y el code rade (la cantidad de bit (información) que se envía para asegurar que no exista perdida de información a pesar de la interferencia que pueda existir), para garantizar una operación eficiente y prolongar la vida útil del sistema de energía de los dispositivos.

Por otro lado, los resultados del segundo escenario demuestran que la influencia del factor de dispersión en el tiempo en el aire (ToA) y la cantidad de payload bits es significativa en las redes LoRa. Se observa un aumento en el ToA a medida que aumenta la cantidad de bits y disminuye el factor de dispersión. Además, se debe tener en cuenta que un ToA demasiado largo puede afectar negativamente la calidad de los datos

transmitidos y aumentar el consumo de energía del dispositivo emisor. Es importante elegir cuidadosamente el factor de dispersión y la cantidad de bits para asegurar una transmisión de datos eficiente y de alta calidad.

Es necesario tener en cuenta que estos resultados se obtuvieron a través de una simulación y pueden no ser completamente representativos de la realidad, pero aun así proporcionan información útil para el diseño y optimización de redes de sensores inalámbricos.

CAPITULO IV: DISCUSIÓN

En el primer antecedente Petäjäjärvi, et al. presentaron la importancia de considerar la vida útil de los dispositivos en las redes inalámbricas. Los resultados de la investigación mostraron que es posible prolongar la vida útil de los nodos de la red LoRa al encontrar un equilibrio entre la calidad de transmisión de datos y el consumo de energía. Además, el análisis de los resultados permitió identificar un SF óptimo que garantiza un buen equilibrio entre la calidad de transmisión y el consumo de energía.

En el segundo antecedente, Fotouhi, et al. [22] se discutió la importancia del ahorro de energía en las redes de sensores inalámbricos para la implementación de sistemas de monitoreo y control remoto. Los resultados de la investigación permiten concluir que la selección adecuada del SF en la red LoRa puede ser una estrategia efectiva para reducir el consumo de energía de los dispositivos y prolongar su vida útil. Esto es especialmente importante en aplicaciones de monitoreo y control remoto, donde la duración de los dispositivos es crítica para garantizar la continuidad del servicio.

En la investigación de Slabicki, M. et al. se enfocaron en el impacto que el ancho de banda utilizado tuvo sobre el consumo de energía de los dispositivos de redes inalámbricas. Los resultados obtenidos en la investigación confirmaron la importancia de considerar el consumo de energía en la selección de los parámetros de transmisión de la red LoRa, incluyendo la variación del factor de dispersión (SF). El ancho de banda de 125 kHz utilizado en esta investigación es el valor optimo en la especificación de LoRa, y permite una buena calidad de transmisión de datos sin afectar significativamente el consumo de energía.

Jung y Yoo discutieron la importancia del CSMA (Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Detección de Colisiones) en la reducción del consumo de energía en las redes inalámbricas. En la investigación, el protocolo CSMA se utilizó en la simulación para medir el consumo de energía de los dispositivos de la red LoRa al variar el SF. Los resultados mostraron que el SF tiene un impacto significativo en el consumo de energía, lo que demuestra la importancia de considerar este parámetro en el diseño y despliegue de redes inalámbricas.

Por último, Bouras, C. et al presentó la importancia de la calidad de transmisión de datos en las redes inalámbricas. Los resultados de la investigación permitieron identificar un SF óptimo que garantiza una buena calidad de transmisión de datos sin

afectar significativamente el consumo de energía. Esto demuestra la importancia de considerar tanto el consumo de energía como la calidad de transmisión de datos en el diseño y despliegue de redes inalámbricas.

La mayoría de los antecedentes consideraron importante la selección de los parámetros para reducir el consumo de energía en los dispositivos IoMT, ya que el tiempo que estos dispositivos se mantienen encendidos permite mayor adquisición de información y menor costo considerando la cantidad de datos que deben censar. Los resultados de esas investigaciones ayudaron a corroborar la validez de los resultados obtenidos en esta investigación, considerando que solo se aplicó entornos virtuales y no reales.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En esta investigación se presentaron los resultados de la evaluación del rendimiento de una red de sensores médicos inalámbricos de larga distancia en la ciudad de Esmeraldas, utilizando el modelo de simulación LoRa. El objetivo fue analizar la cobertura de la red, la tasa de transmisión de datos, el consumo de energía de los nodos y el tiempo que tarda un paquete en ser transmitido por un nodo y recibido por otro (ToA).

Por tal motivo se desarrolló un modelo de simulación utilizando el software OMNET++ y el módulo FLoRa, y estuvo compuesto por seis elementos: servidor de red LoRa, nsRouter, servidor en la nube, gwRouter, LoRaGW y LoRaNodes. Los parámetros configurados fueron la frecuencia de transporte, el ancho de banda, la razón de código, el factor de dispersión y el poder de transmisión. La simulación se realizó en un área de 73556.384 km^2 con 100 nodos distribuidos aleatoriamente. Los resultados mostraron que la cobertura de la red varió significativamente en función de los parámetros de configuración.

Debido a lo mencionado anteriormente se examinaron dos escenarios con la finalidad de evaluar el efecto que causa la manipulación del factor de dispersión (SF) sobre el consumo de energía y el tiempo en el aire (ToA) donde se llegó a la siguiente conclusión.

Los resultados mostraron que la variación del SF influye tanto en la cantidad de energía que consumen los dispositivos como en el tiempo que tarda un paquete en ser transmitido por un nodo y recibido por otro (ToA), lo que demuestra la importancia de considerar este parámetro en el diseño y despliegue de redes inalámbricas. Además, los resultados permitieron identificar un SF óptimo que garantiza un buen equilibrio entre la calidad de transmisión de datos y el consumo de energía de los nodos de la red. En este estudio, se encontró que el SF de 7 logró el menor consumo de energía en la simulación y un menor ToA, pero a costa de una calidad de transmisión de datos inferior, esto debido a que existe mayor colisión de datos. Por otro lado, el SF de 12 produjo el mayor consumo de energía y un mayor ToA, pero con una mejora en la calidad de transmisión de datos por haber menor colisión de datos. Por lo tanto, se puede concluir que un SF de 10 proporciona un equilibrio adecuado entre el consumo de energía y la calidad de transmisión de datos en la red LoRa y en cuanto al ToA es el que tiene un porcentaje más

equilibrado en cuanto a cantidad de bits y tiempo (segundos) de transmisión. Este resultado es importante para prolongar la vida útil de los dispositivos de la red y garantizar una operación eficiente de la misma.

5.2 Recomendaciones

Se propone que el área de la salud y de TI de la PUCESE trabajen en conjunto para que en un futuro se mejore la atención médica en los centros de salud de esta universidad. Con los resultados de esta investigación se determinó una manera óptima de configurar una red LoRa para que dispositivos IoMT tengan más tiempo de vida hasta volver a necesitar una nueva carga de energía, haciendo muy rentable realizar una implementación de estos dispositivos.

Otro aspecto que permitió identificar esta investigación fue la necesidad de tener al menos 2 o 3 gateways en el campus Esmeraldas, esto con el fin de que no haya colisión de datos al tener varios dispositivos conectados a un solo gateway.

Para finalizar se aconseja realizar esta implementación en la PUCESE teniendo una inversión y dedicarle el tiempo adecuado para que un sistema de monitoreo a los estudiantes, maestros y personal de esta universidad logre funcionar adecuadamente y ayude en la salud de todos los involucrados.

REFERENCIAS

[1] J. C. Neffa, “Introducción al concepto de condiciones y medio ambiente de trabajo (CyMAT),” *Voces del Fénix*, vol. 6, no. July 2015, p. 16, 2015, [Online]. Available: http://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/13769%0Ahttp://hdl.handle.net/11336/13769%0Ahttp://www.vocesenelfenix.com/content/introducción-al-concepto-de-condicion

[2] A. H. Mohd Aman, W. H. Hassan, S. Sameen, Z. S. Attarbashi, M. Alizadeh, and L. A. Latiff, “IoMT amid COVID-19 pandemic: Application, architecture, technology, and security,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 174, no. May, p. 102886, 2021, doi: 10.1016/j.jnca.2020.102886.

[3] M. Maksimović, V. Vujović, and B. Perišić, “A custom Internet of Things healthcare system,” *2015 10th Iber. Conf. Inf. Syst. Technol. Cist. 2015*, 2015, doi: 10.1109/CISTI.2015.7170415.

[4] G. Devi, R. Rohini, and P. Suganya, “Internet of things: A survey on privacy and securityfor smart homes,” *IIOAB J.*, vol. 7, no. 9Special Issue, pp. 667–674, 2016.

[5] P. M. C. A.-G. Lance, “Publish/subscribe-enabled software defined networking for efficient and scalable iot communications,” *Flash Mem. Summit*, no. September, pp. 48–54, 2014.

[6] Institute of Electrical and Electronics Engineers, “An Implementation of IoT for Healthcare,” no. December, pp. 411–416, 2015.

[7] T. N. Gia *et al.*, “IoT-based continuous glucose monitoring system: A feasibility study,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 109, pp. 327–334, 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.05.359.

[8] M. Abdullah azzawi, K. A. Abu Bakar, and R. Hassan, “A Review on Internet of Things in Healthcare Applications,” *Lect. Notes Networks Syst.*, vol. 375, no. November, pp. 387–394, 2022, doi: 10.1007/978-981-16-8763-1_31.

[9] T. Tekeste Habte, H. Saleh, B. Mohammad, and M. Ismail, “IoT for Healthcare,” in *Ultra Low Power ECG Processing System for IoT Devices*, vol. 5, no. 2, Springer International Publishing, 2019, pp. 7–12. doi: 10.1007/978-3-319-97016-5_2.

[10] N. Misran, M. S. Islam, G. K. Beng, N. Amin, and M. T. Islam, “IoT Based Health Monitoring System with LoRa Communication Technology,” *Proc. Int. Conf. Electr. Eng. Informatics*, vol. 2019-July, pp. 514–517, 2019, doi: 10.1109/ICEEI47359.2019.8988869.

[11] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, “A study of Lora: Long range & low power networks for the internet of things,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 9, pp. 1–18, 2016, doi: 10.3390/s16091466.

[12] S. Devalal and K. Iot, “LoRa technology-an overview,” *2018 Second Int. Conf. Electron. Commun. Aerosp. Technol.*, no. Iceca, pp. 284–290, 2018.

[13] S. Jardosh and P. Ranjan, “A survey: Topology control for wireless sensor networks,” *Proc. ICSCN 2008 - Int. Conf. Signal Process. Commun. Netw.*, pp. 422–427, 2008, doi: 10.1109/ICSCN.2008.4447231.

[14] J. Rejina Parvin, “An Overview of Wireless Mesh Networks,” *Wirel. Mesh Networks - Secur. Archit. Protoc.*, pp. 1–11, 2020, doi: 10.5772/intechopen.83414.

[15] B. S. Chaudhari, M. Zennaro, and S. Borkar, “LPWAN technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations,” *Futur. Internet*, vol. 12, no. 3, 2020, doi: 10.3390/fi12030046.

[16] J. Pan, “A Survey of Network Simulation Tools: Current Status and Future Development,” *CSE567M Comput. Syst. Anal.*, pp. 1–13, 2008.

[17] X. Xian, W. Shi, and H. Huang, “Comparison of OMNET++ and other simulator for WSN simulation,” *2008 3rd IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2008*, pp. 1439–1443, 2008, doi: 10.1109/ICIEA.2008.4582757.

[18] C. P. Kruger, A. M. Abu-Mahfouz, and G. P. Hancke, “Rapid prototyping of a wireless sensor network gateway for the internet of things using off-the-shelf components,” *Proc. IEEE Int. Conf.*

Ind. Technol., vol. 2015-June, no. June, pp. 1926–1931, 2015, doi: 10.1109/ICIT.2015.7125378.

[19] M. Slabicki, G. Premsankar, and M. Di Francesco, "Adaptive configuration of lora networks for dense IoT deployments," *IEEE/IFIP Netw. Oper. Manag. Symp. Cogn. Manag. a Cyber World, NOMS 2018*, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1109/NOMS.2018.8406255.

[20] H. Jung and S. Yoo, "GRU-based Adaptive Data Rate Control Algorithm Considering the Mobility of LoRa Devices," *J. Inst. Control. Robot. Syst.*, vol. 28, no. 6, pp. 640–647, 2022, doi: 10.5302/j.icros.2022.22.0059.

[21] J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, R. Yasmin, M. Hämäläinen, and J. Iinatti, "Evaluation of LoRa LPWAN Technology for Indoor Remote Health and Wellbeing Monitoring," *Int. J. Wirel. Inf. Networks*, vol. 24, no. 2, pp. 153–165, 2017, doi: 10.1007/s10776-017-0341-8.

[22] D. Mustefa, H. Fotouhi, S. Punnekkat, and D. Scholle, "Enabling time-critical communications in medical IoT applications," in *14th International Conference on ICT, Society, and Human Beings, ICT 2021, 18th International Conference on Web Based Communities and Social Media, WBC 2021 and 13th International Conference on e-Health, EH 2021 - Held at the 15th Multi-Conference on Comp*, 2021, pp. 152–160. doi: 10.33965/eh2021_202106l019.

[23] C. Bouras, A. Gkamas, S. Katsampiris, and V. Kokkinos, "Comparison of LoRa Simulation Environments," 2019, p. 12. doi: 10.1007/978-3-030-33506-9_33.

[24] EL CONGRESO NACIONAL, "Ley Órganica de Salud," *Plataforma Prof. Investig. Jurídica*, p. 46, 2006, [Online]. Available: https://www.salud.gob.ec/wp-content/uploads/2017/03/LEY-ORGÁNICA-DE-SALUD4.pdf

[25] Asamblea Nacional del Ecuador, "Ley Orgánica de Salud (Última Reforma 29-04-2022)," no. 423, pp. 447–467, 2009, [Online]. Available: https://biblioteca.defensoria.gob.ec/bitstream/37000/3426/1/Ley Orgánica de Salud.pdf

[26] Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información, "Acuerdo Nro. mintel-mintel-2022-0031," *Mintel*, 2021, [Online]. Available: https://www.telecomunicaciones.gob.ec/ecuador-redujo-el-analfabetismo-digital/%0Ahttps://www.telecomunicaciones.gob.ec/normativa/

ANEXOS

ANEXO 1: Instrumento para medir nivel de satisfacción personal PUCESE

1. Cree usted que la frecuencia con que se realiza los cheques médicos es suficiente para el cuidado de su salud.

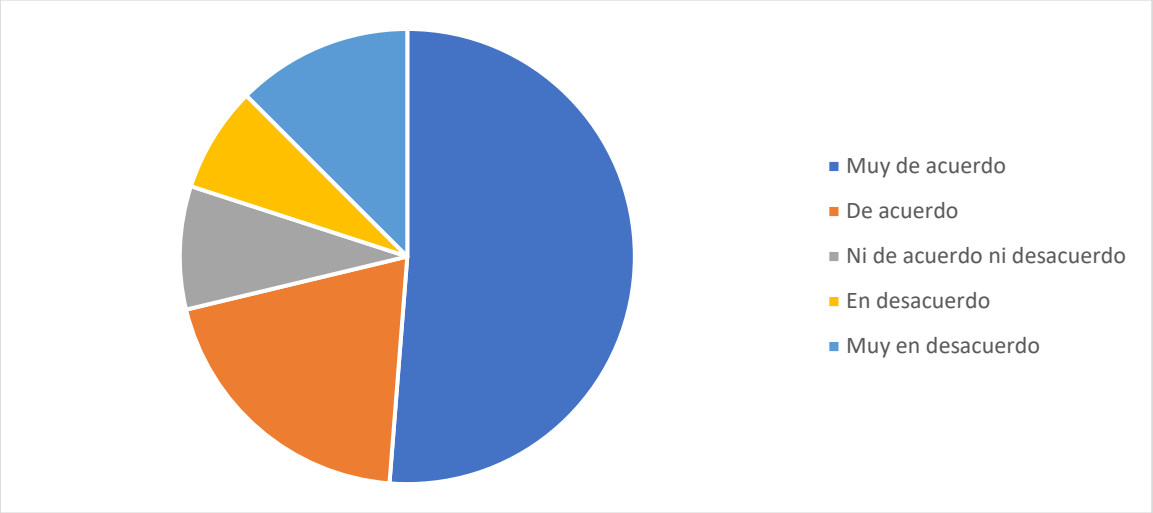
Muy de acuerdo	De acuerdo	Ni de acuerdo ni desacuerdo	En desacuerdo	Muy en desacuerdo
[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]

1. Los servicios médicos que brindo los consultorios de la PUCESE abastecen para el cuidado de la salud del personal.

Muy de acuerdo	De acuerdo	Ni de acuerdo ni desacuerdo	En desacuerdo	Muy en desacuerdo
[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]

ANEXO 2: resultados de medir nivel de satisfacción personal PUCESE

1. Cree usted que la frecuencia con que se realiza los cheques médicos es suficiente para el cuidado de su salud.



Los servicios médicos que brindo los consultorios de la PUCESE abastecen para el cuidado de la salud del personal

