

**Centro de Investigación Científica y de Educación Superior  
de Ensenada, Baja California**



---

**Programa de Posgrado en Ciencias  
en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en  
Telecomunicaciones**

---

**Comparación de soluciones basadas en LPWAN e IEEE 802.15.4  
para aplicaciones de salud móvil (“m-Health”)**

Tesis  
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**Luis Javier Mendivil Gastélum**

Ensenada, Baja California, México  
2017



Tesis defendida por  
**Luis Javier Mendívil Gastélum**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. Salvador Villarreal Reyes**  
Codirector de tesis

---

**Dr. Joel Ruiz Ibarra**  
Codirector de tesis

**Dr. Raúl Rivera Rodríguez**

**Dr. Raúl Tamayo Fernández**

**Dr. Roberto Conte Galván**

**Dr. Jaime Sánchez García**

**Dr. Heriberto Márquez Becerra**



---

**Dr. Miguel Ángel Alonso Arévalo**  
Coordinador del Posgrado en Electrónica y  
Telecomunicaciones

---

**Dra. Rufina Hernández Martínez**  
Directora de Estudios de Posgrado

Luis Javier Mendívil Gastélum © 2017

*Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.*



Resumen de la tesis que presenta **Luis Javier Mendívil Gastélum** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones.

**Comparación de soluciones basadas en LPWAN e IEEE 802.15.4 para aplicaciones de salud móvil (“m-Heath”)**

Resumen aprobado por:

---

**Dr. Salvador Villarreal Reyes**  
Codirector de tesis

---

**Dr. Joel Ruiz Ibarra**  
Codirector de tesis

En la actualidad, los avances en la tecnología han hecho que se tenga una mayor facilidad de recolectar información dentro de los hogares, industrias y alrededor de las ciudades. Las personas que se encargan de tomar decisiones sobre alguna tarea en los lugares previamente mencionados, pueden hacer uso significativo de la información que se está recolectando e interpretando. Dichos avances dan lugar a lo que se conoce como Internet de las cosas (IoT). Para lo anterior, es sumamente importante contar con tecnologías de comunicación inalámbrica que atiendan el compromiso existente entre cobertura y consumo de energía. Las soluciones existentes están limitadas en cuestión de cobertura de red o consumen mucha energía. Esta situación está cambiando con el surgimiento de redes inalámbricas de sensores de bajo consumo y largo alcance. Sin embargo, debido a que son tecnologías emergentes, es importante evaluar si estas tecnologías podrán sustituir a las existentes en escenarios de IoT. Es por ello que este trabajo de tesis se centra en desarrollar una comparativa entre una de las tecnologías emergentes de redes de área amplia de baja potencia (LPWAN, “*Low Power Wide Area Network*”) y las tecnologías ya existentes como IEEE 802.154/ZigBee. Es pertinente la evaluación de estas tecnologías bajo las aplicaciones de salud móvil (“m-Health”), enfocándose en particular en adultos mayores en donde se pretende monitorear posición y detección de caídas. La evaluación se enfoca en determinar cuál tecnología ofrece mejores prestaciones, en términos de consumo de energía, para este tipo de aplicación en particular, y así mismo generar recomendaciones para diseño de la red. Una vez desarrollado el esquema se realizará el análisis de desempeño por medio de experimentación con módulos transceptores LPWAN, IEEE 802.15.4 y telefonía móvil.

**Palabras clave:** Telemonitoreo, salud móvil, localización, detección de caídas, LPWAN, IEEE 802.15.4.



Abstract of the thesis presented by **Luis Javier Mendivil Gastélum** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in Telecommunications.

### **Comparison of LPWAN and IEEE 802.15.4 based solutions for mobile health applications (m-Health)**

Abstract approved by:

---

**Dr. Salvador Villarreal Reyes**  
Thesis Codirector

---

**Dr. Joel Ruiz Ibarra**  
Thesis Codirector

At present, advances in technology have made it easier to gather information within households, industries and around cities. People who are in charge of making decisions about some task in the places previously mentioned could make significant use of the information being recollected. These advances lead to what is known as Internet of Things (IoT). In order to achieve such benefits, wireless communication technologies, which address the existing tradeoff between energy consumption and coverage area are vital. In this sense, it is important to note that existing solutions are limited in network coverage or energy consumption. This situation is changing with the creation of low consumption and long range wireless sensor networks. However, as these are emerging technologies, it is important to evaluate if this kind of networks could replace existing technologies for IoT scenarios. In this thesis, we focus on developing a comparison between emerging low-power wide area network (LPWAN) technologies and existing technologies such as IEEE 802.15.4/Zigbee. The evaluation of these technologies under mobile health (m-Health) applications is particularly relevant. Specifically, in scenarios focused on elderly people where position monitoring and fall detection are considered. The main idea is to compare existing technologies and LPWAN considering the bandwidth and transmission rate required for each parameter to be monitored. We are going to evaluate which technology offers better performance in terms of energy consumption for this particular applications, and also generate recommendations for network design. Once the scheme has been developed, performance analysis will be performed through experimentation with LPWAN, IEEE 802.15.4 and mobile telephony transceivers.

**Keywords:** Telemonitoring, m-Health, location, fall detection, LPWAN, IEEE 802.15.4.





## Dedicatoria

*A mis padres, Ramón y Trinidad Guadalupe, por su apoyo incondicional, comprensión y consejos que me han dado para que llegara a este punto de mi vida.*



## **Agradecimientos**

Agradezco a todo el personal del departamento de electrónica y telecomunicaciones del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), por abrirme sus puertas, darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado, y por haber sido un segundo hogar durante mi maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por haberme otorgado una beca con la cual lleve a cabo mis estudios de posgrado y permitirme cumplir una meta más en mi desarrollo profesional (número de becario 394560).

A toda mi familia: hermanos, sobrinos, tíos, primos por el apoyo constante en mi maestría, y por estar pendiente de mí en todo este tiempo.

A mis asesores de tesis al Dr. Salvador Villarreal Reyes, al Dr. Joel Ruiz Ibarra y a mi tercer codirector al Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda por brindarme su amistad, apoyo, sus enseñanzas, consejos, y sobre todo por su paciencia. Muchas gracias por el tiempo extra dedicado. No existen palabras con las cuales pueda expresar mi más profundo agradecimiento.

A los miembros de mi comité de tesis al Dr. Jaime Sánchez, Dr. Raúl Tamayo, Dr. Raúl Rivera, Dr. Roberto Conte y al Dr. Heriberto Márquez por su apoyo, tiempo y valiosas contribuciones durante la realización de este trabajo.

Al grupo de investigación ARTS por haberme recibido y ayudado en toda mi maestría. Gracias por todo Enrique, Christian, Shiro, Alex, Pedro, Rodrigo, Orlando y Edwin, muchas gracias por su amistad, y por todo el apoyo que me brindaron.

Al grupo de las ARTas por el cariño que me brindaron, las múltiples charlas, risas y diversión compartidas, sin olvidar de las deliciosas comidas que nos prepararon. Muchas gracias Johana, Cecy, Lily de Shiro, Lily de Edwin, Jocka y Olly.

Un agradecimiento especial a mis padres adoptivos, Mañe y Beatriz, por todos los consejos, motivación, y todo el apoyo que me han brindado. No tengo palabras con que agradecer por toda la ayuda que me han dado.

A todos mis compañeros que me apoyaron en todo el transcurso de mi maestría. A mis amigos Guillermo, Ramón, Andrea, Jairo, Neto, Ismael, Roilhi, Giovanni, Paul, Roger, Alberto, Jorge, con quienes tuve la oportunidad de conocer en esta etapa de mi vida, gracias por todos esos momentos.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	x
Lista de tablas.....	xii
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema .....	4
1.2. Justificación .....	5
1.3. Objetivo General .....	6
1.4. Objetivos Particulares .....	7
1.5. Metodología .....	7
1.6. Organización de la Tesis .....	8
<b>Capítulo 2. Sistemas para localización y detección de caídas .....</b>	<b>11</b>
2.1. Introducción .....	11
2.2. Arquitecturas comúnmente utilizadas .....	11
2.2.1. Sin detección de caídas .....	12
2.2.2. Con detección de caídas.....	13
2.3. Técnicas de estimación de distancias.....	14
2.3.1. Tiempo de llegada .....	15
2.3.2. Ángulo de llegada .....	16
2.3.3. Diferencia de tiempo de llegada .....	16
2.3.4. Fuerza de la señal recibida .....	16
2.4. Algoritmos de localización .....	17
2.4.1. Centroide.....	18
2.4.2. Centroide Ponderado .....	18
2.5. Algoritmos de detección de caídas .....	19
2.5.1. Detección del pico de aceleración.....	19
2.5.2. Detección de la colisión.....	20
2.5.3. Detección de las etapas de caídas.....	20
2.5.4. Detección de postura antes y después del pico de aceleración .....	21

2.6.	Discusión .....	21
<b>Capítulo 3. Tecnologías de redes inalámbricas para el sistema de localización y monitoreo .....</b>		<b>25</b>
3.1.	Introducción .....	25
3.2.	Long Range (LoRa) .....	26
3.2.1.	Arquitectura .....	26
3.2.2.	Capa física.....	28
3.2.3.	Capa MAC.....	29
3.3.	IEEE 802.15.4.....	29
3.3.1.	Arquitectura .....	30
3.3.2.	Capa física.....	32
3.4.	Telefonía móvil - GSM .....	33
3.5.	Redes inalámbricas de sensores para un sistema de localización y detección de caídas de pacientes .....	34
<b>Capítulo 4. Diseño de la cama de pruebas experimental para localización de pacientes .....</b>		<b>37</b>
4.1.	Introducción .....	37
4.2.	Arquitectura de la cama de pruebas .....	38
4.2.1.	Selección del sistema de procesamiento .....	38
4.2.2.	Selección del módulo LoRa.....	39
4.2.2.1.	Discusión módulos LoRa.....	40
4.2.3.	Selección del módulo IEEE 802.15.4.....	42
4.2.4.	Selección del módulo GSM.....	42
4.3.	Implementación del algoritmo de localización .....	43
4.3.1.	Descripción de la tecnología utilizada .....	43
4.3.1.1.	Arquitectura .....	44
4.3.2.	Implementación del algoritmo de localización .....	45
<b>Capítulo 5. Implementación de la cama de pruebas experimental .....</b>		<b>53</b>
5.1.	Introducción .....	53
5.2.	Implementación experimental de la cama de pruebas.....	53
5.3.	Descripción de los escenarios de prueba experimental .....	55
5.3.1.	Detección de caídas y localización .....	55
5.3.2.	Escenario 1. Pruebas de consumo de batería .....	57
5.3.3.	Escenario 2. Pruebas en un escenario con movilidad .....	58
5.3.4.	Escenario 3. Pruebas de cobertura .....	60
5.4.	Resumen.....	61

<b>Capítulo 6. Resultados de la cama de pruebas experimental .....</b>	<b>63</b>
6.1. Pruebas de consumo de batería.....	63
6.2. Pruebas en un escenario con movilidad .....	66
6.3. Pruebas de cobertura.....	68
<b>Capítulo 7. Conclusiones y trabajo a futuro .....</b>	<b>71</b>
7.1. Introducción .....	71
7.2. Conclusiones.....	71
7.2.1. Sobre el diseño de la cama de pruebas.....	71
7.2.2. Sobre la implementación de la cama de pruebas experimental.....	72
7.2.3. Sobre la evaluación de los resultados de la cama de pruebas experimental .....	73
7.3. Trabajo a futuro.....	73
<b>Literatura citada .....</b>	<b>75</b>

## Lista de figuras

Figura		Página
1	Diagrama a bloques del sistema.....	14
2	Tiempo de llegada.....	15
3	Ángulo entre nodos.....	16
4	Pila de protocolos LoRa.....	26
5	Arquitectura de red LoRa.....	27
6	Canales de radiofrecuencia del protocolo LoRa.....	28
7	Ejemplos de topología de red para IEEE 802.15.4.....	31
8	Bandas de frecuencia de operación de IEEE 802.15.4.....	33
9	Diagrama a bloques del sistema.....	37
10	Diagrama de estados de los dispositivos Bluetooth Low Energy.....	45
11	Topología estrella para redes de Bluetooth Low Energy.....	45
12	Esquema experimental del dispositivo tipo observador.....	48
13	Variación de RSS con respecto al tiempo.....	49
14	Escenario de medición de RSSI.....	49
15	Interfaz gráfica desarrollada con la utilización de los planos representativos del edificio de Física Aplicada que fueron proporcionados por el personal administrativo de CICESE.....	51
16	Esquema de evaluación del algoritmo de localización.....	51
17	Implementación del algoritmo de localización en la segunda planta del edificio de Física Aplicada.....	52
18	Esquema experimental del dispositivo tipo observador BLE con transceptor LoRa.....	54



19	Esquema experimental del dispositivo tipo observador BLE con transceptor IEEE 802.15.4.....	54
20	Esquema experimental del dispositivo tipo observador BLE con transceptor GSM.....	55
21	Coordenadas de posicionamiento de los dispositivos BLE anunciantes en: (a) primera planta, (b) segunda planta y (c) tercera planta del edificio de Física Aplicada.....	56
22	Formato de la carga útil.....	56
23	Esquema experimental para pruebas de movilidad utilizando dispositivos LoRa.....	58
24	Esquema experimental para pruebas de movilidad utilizando dispositivos IEEE 802.15.4.....	59
25	Esquema experimental para pruebas de movilidad utilizando dispositivo GSM para SMS.....	59
26	Esquema experimental para pruebas de movilidad utilizando dispositivos GSM para UDP.....	59
27	Puntos de medición en el interior.....	60
28	Puntos de medición en el exterior.....	61
29	Comparación de energía consumida por transmisión por byte.....	65
30	Pruebas de movilidad en la tercera planta.....	67
31	Mediciones de RSSI promedio en el interior y exterior del edificio de Física Aplicada utilizando los transceptores LoRa.....	69
32	Mediciones de RSSI promedio en el interior y exterior del edificio de Física Aplicada utilizando los transceptores IEEE 802.15.4.....	69

## Lista de tablas

Tabla		Página
1	Bandas de frecuencia para IEEE 802.15.4.	33
2	Comparación entre LoRa e IEEE 802.15.4.	35
3	Comparación entre los sistemas de procesamiento utilizados.	39
4	Comparación de módulos LoRa.	41
5	Mediciones de RSSI en cinco puntos.	50
6	Características de la fuente de alimentación.	57
7	Resultados de la prueba fija de consumo considerando un envío de 2 paquetes por segundo.	63
8	Tiempo de vida del sistema	66
9	Resultados de la prueba de movilidad.	67

# Capítulo 1. Introducción

---

Actualmente, los sistemas de cuidado de la salud han presentado un incremento exponencial en el número de usuarios, principalmente en la población de los adultos en plenitud, lo que evidentemente incrementa los costos de operación de los sistemas de salud. En este sentido, el uso de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC's, por sus siglas en inglés) en el sector del cuidado de la salud ha contribuido de manera significativa en la reducción de costos y aumentar su eficiencia. El uso de las TICs en los sistemas de la salud habilita diversos beneficios como: disminuir costos, eficacia en el seguimiento de las enfermedades crónicas, disminuir el número de ingresos al hospital innecesarios, entre otros.

El uso de dispositivos móviles (p.ej. teléfonos inteligentes) ha favorecido al surgimiento del área de salud móvil (mHealth, "*mobile Health*"), la cual se enfoca en la utilización de dispositivos de comunicación móviles para aplicaciones en medicina. A través de mHealth es posible proporcionar diversos servicios de salud, como monitoreo continuo de adultos mayores.

La asistencia de cuidados no siempre requiere la presencia de una enfermera en el hogar (Dobkin & Dorsch, 2014). Gracias a las tecnologías de comunicaciones actuales se pueden brindar soluciones de telemonitoreo a adultos mayores de tal forma que puedan seguir viviendo en sus hogares de manera independiente. De manera adicional el telemonitoreo permite obtener suficiente información sobre el comportamiento y el estado de diferentes variables fisiológicas de una persona. Esto puede contribuir a realizar un mejor diagnóstico de su salud e incluso tomar acciones preventivas. En consecuencia, se podría esperar un mayor índice de esperanza de vida saludable.

Debido al riesgo de sufrir caídas o diferentes problemas de salud asociados con la edad como deterioro cognitivo leve (MCI, "*Mild Cognitive Impairment*"), demencia frontotemporal, enfermedad de Parkinson, y enfermedad de Alzheimer (AD, "*Alzheimer's Disease*"), las personas que sufren de MCI y otros tipos de demencia puede que sufran un decremento en sus habilidades cognitivas, pero aun cuentan con un alto grado de autonomía como para vivir por si solos, caminar, etc. Su mayor discapacidad está relacionada con su memoria por lo que las personas pueden desorientarse, y tener problemas al momento de querer regresar a sus hogares. Por lo tanto, es deseable que las personas de la tercera edad tengan asistencia cercana y mejor cuidado. Sin embargo, dado al incremento sustancial en la demanda de servicios de cuidado de la salud para los adultos mayores no se tiene la infraestructura o incluso los recursos para que estos vivan en casas de cuidado especializadas. Los pacientes en la tercera edad, particularmente los que cuentan con condiciones crónicas, requieren monitoreo continuo para detectar cambios en su condición lo más pronto posible (Ni Scanail, Ahearne, & Lyons, 2006). El poder monitorear remotamente las

actividades de los adultos mayores puede contribuir de forma importante a mejorar la calidad de vida de estos, al darle mayor independencia manteniendo la posibilidad de brindarle asistencia médica cuando sea requerida.

Conforme a datos del Consejo Nacional de Población (CONAPO) se estima que para el año 2030 habrá 20.4 millones de adultos mayores, lo que representará 14.8% del total de población en México. Como consecuencia se acrecentará la demanda de servicios relacionados con la salud, vivienda, pensiones y espacios urbanos que faciliten el tránsito de estas personas. Además, datos de la Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica (ENADID) del año 2014, señalan que del total de adultos mayores, un 26% cuentan con una discapacidad (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2016)

Así mismo, el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) indica que, en el año 2013, fallecieron a consecuencia de una caída 961 adultos mayores de 65 años y más; donde el 58% de los casos se dio por mortandad cuyas lesiones se originaron dentro del hogar. Adicionalmente, se debe mencionar que 15,127 personas de 65 años y más, ocuparon hospitalización a causa de sufrir una caída (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2016).

Por estas razones, se considera que, en los adultos mayores, las caídas son uno de los riesgos más importantes, convirtiéndose en un grave problema de salud pública. Esto por las lesiones que producen, en donde lleva como resultado la necesidad de atención médica, lo cual puede llegar a ser costoso al ser un monitoreo a largo plazo, además que existen largas listas de espera para consultas con profesionales de la salud (México: Secretaría de Salud, 2008)

Dada la información previamente mencionada, los costos de hospitalización se incrementan año con año al igual que las terapias de rehabilitación después que la persona ha sufrido una enfermedad mayor, una cirugía o una caída. Los hospitales están buscando enviar a las personas a sus hogares lo antes posible para que allá lleven a cabo su recuperación. Durante este proceso, es necesario llevar a cabo el monitoreo continuo, estos escenarios han cobrado gran relevancia y urgencia en las áreas de telemedicina y monitoreo remoto de pacientes en sus hogares.

Muchos de los sistemas que se utilizan en la actualidad llegan a ser relativamente caros y dicho costo depende del número de sensores que se utilicen, por lo que existe un intento de desarrollar sistemas de monitoreo en el hogar utilizando un número óptimo de sensores. Debido a esto, y al hecho que los teléfonos inteligentes llegan a ser algo intrusivos y requieren recargar su batería cada día al igual que llegan a tener un alto costo, se ha presentado un incremento de la demanda de sistemas de telemonitoreo que sean económicos, no intrusivos, y que funcionen de manera continua, permitiendo reducir costos. Los

sistemas portátiles de monitoreo permiten a los pacientes llevar a cabo una supervisión constante para brindar atención médica cuando sea requerida. Adicionalmente, la información de las actividades realizadas puede ser de ayuda a los profesionales de la salud con el propósito de brindar un mejor cuidado, que permita la localización de la persona en caso que esta se desoriente. En este sentido se puede detectar alguna de las siguientes situaciones:

- Riesgo de estar solo en un cuarto que puede ser peligroso como puede ser la cocina, etc.
- Que la persona presente se pierda, es decir, que salga del edificio o su hogar.
- Conducta que indique ansiedad o ganas de escapar.
- Falta de movimiento por un tiempo prolongado en un lugar inusual, lo cual puede indicar que la persona ha sufrido un accidente o tiene un cierto grado de desorientación.
- Se puede detectar la caída de una persona mediante la utilización de acelerómetros y un botón que se encuentren integrados a un sistema portable y poder de esta manera enviar una señal de alerta hacia una persona que pueda brindar asistencia inmediata.

De esta manera, el posicionamiento en interiores es un componente de mucha ayuda que permite localizar, monitorear y brindar un servicio enfocado para personas mayores. Con ello, se hace uso de las comunicaciones inalámbricas, las cuales son ubicuas y predominaran en escenarios relacionados con Internet de las Cosas (IoT) en donde componentes físicos contengan dispositivos electrónicos embebidos capaces de comunicarse con otros dispositivos, o sistemas de información, como puede ser un operador. Muchos de estos dispositivos son alimentados mediante baterías, por lo que necesitan conservar energía. En este contexto, han emergido muchos estándares para dar solución a estas necesidades, siendo de los más notables el estándar IEEE 802.15.4 para redes de área personal de baja tasa (LRWPAN). El protocolo de Internet ha sido adaptado para trabajar sobre 802.15.4 a través del protocolo de internet versión 6 (IPv6) sobre redes de área personal de baja tasa (6LoWPAN) (Hui & P., 2011).

Sin embargo, estas soluciones pueden presentar un problema para aplicaciones de monitoreo de pacientes móviles, ya que debido a su rango de transmisión puede ser necesario realizar traspasos entre diferentes áreas de cobertura o utilizar una arquitectura híbrida. Una opción para el aprovisionamiento de servicios de telemonitoreo es la utilización de redes de área amplia de bajo consumo (LPWAN), las cuales pueden proveer enlaces de baja tasa de datos con distancias de decenas de kilómetros. Este tipo de redes están enfocadas a la necesidad de movilidad, servicios de localización, y comunicación de cobertura amplia para objetos inteligentes (Semtech, 2015b). La tecnología LPWAN para aplicaciones de Máquina a

Máquina (M2M, “Machine to Machine”) e IoT ha visto un gran auge debido a sus ventajas comparadas con las tecnologías celulares actuales, así como menores costos, mayor tiempo de vida de sus baterías, mayor distancia de cobertura, mayor densidad de nodos y una simple topología de red. Sin embargo, debido a que han sido propuestos recientemente, aún es necesario evaluar las capacidades de la tecnología LPWAN para ser utilizada como base para el despliegue de sistemas de telemonitoreo. Principalmente en el contexto de adultos mayores.

### **1.1. Planteamiento del problema**

Los avances en la tecnología inalámbrica, específicamente estándares como Bluetooth Low Energy (BLE), Ant+ o IEEE 802.15.4, han resultado en la creación de dispositivos ligeros que pueden ser usados por un paciente durante largos periodos, permitiendo la movilidad del paciente y conservando la funcionalidad del dispositivo con una pequeña batería. Por ejemplo, estos dispositivos ligeros pueden ser de utilidad en el monitoreo de los signos vitales o de la posición del paciente.

Sin embargo, una desventaja de estos dispositivos es su rango de transmisión, el cual puede limitar la movilidad del paciente u obligarlo a cargar consigo un dispositivo adicional que provea conectividad de larga distancia como un teléfono celular. En el caso de hospitales o casas de cuidado de adultos mayores, una alternativa a cargar un teléfono celular consiste en desplegar una red con puntos de acceso múltiples en el área en la cual los pacientes se mueven más frecuentemente. Sin embargo, esto no es una tarea trivial ya que puede requerir de la realización de traspasos (“*handoffs*”) cuando el paciente se mueva de un área de cobertura a otra. Un problema con dichos traspasos es que la conectividad y transmisión de las variables que están siendo monitoreadas podría interrumpirse con la consecuente pérdida de información. Es por esta razón que siempre es conveniente buscar alternativas de conectividad que ofrezcan mayores rangos de cobertura sin necesidad de realizar traspasos.

La tecnología LPWAN permite que sus nodos tengan: rangos de transmisión superiores a 1 km, bajo consumo de energía y bajas tasas de datos. La mayoría de dichas soluciones trabaja en alguna de las bandas industrial, científica y médica (“Industrial, Scientific and Medic” - ISM) que están por debajo de 1 GHz. La razón de utilizar dichas bandas son las mejores condiciones de propagación en comparación con la banda de 2.4 GHz. Sin embargo, por esta misma razón la tecnología trabaja con anchos de banda mucho más angostos y menor tasa de bits.

Hasta la fecha las propuestas de LPWAN se han centrado en aplicaciones de domótica (UDOiT, 2016), monitoreo industrial (Semtech White Paper, 2016), (Link Labs, 2016) y agrícola (Puri, 2016), así como aplicaciones de Internet de las cosas (IoT) de baja tasa de datos como en alumbrados inteligentes (InteliLIGHT, 2016). Sin embargo, debido a su rango de cobertura las LPWANs pueden ofrecer ventajas para el monitoreo de pacientes móviles o adultos mayores en condición no crítica en las cuales el principal objetivo sea mandar mensajes de alerta.

Con base en la discusión anterior, resulta claro que tecnologías como LPWAN e IEEE 802.15.4 pueden utilizarse para atender nichos de aplicación similares. Sin embargo, todavía no se tienen elementos suficientes para poder determinar en qué aplicaciones de m-Health o IoT es más conveniente utilizar una u otra tecnología. Por lo tanto, este proyecto de investigación se enfoca a comparar el desempeño de ambas tecnologías en escenarios de aplicación de telemonitoreo móvil y semi-móvil con baja tasa de datos y densidades de usuarios medianas, determinando las ventajas y desventajas ofrecidas por cada tecnología para la implementación de dicha aplicación.

## **1.2. Justificación**

Como se ha mencionado anteriormente, tecnologías inalámbricas como BLE, Ant o IEEE 802.15.4 cuentan con la desventaja de su rango de cobertura, la cual obliga al usuario a cargar con un dispositivo adicional que ayude a proveer la conectividad a larga distancia, un ejemplo de este tipo de dispositivos es un teléfono celular inteligente o un dispositivo tipo puente (p. ej. un puente IEEE 802.15.4-BLE). Esta última opción podría no ser la mejor, debido a que al estar operando con baterías se pueden llegar a requerir ciclos de recarga relativamente cortos lo cual es poco práctico e incómodo para el usuario.

La conectividad de información de manera inalámbrica puede ser vista de dos formas:

- Corto alcance: Bluetooth, WiFi, Zigbee, etc.
- Largo alcance: Modem celular.

Ya se ha mencionado las desventajas de utilizar las tecnologías de corto alcance. Los modems celulares tradicionales son utilizados en aplicaciones que proveen un alto retorno sobre la inversión. Es por ello que estos cuentan con un alto costo, además del costo de su servicio por estar utilizando la red celular. Esta desventaja no es la principal, sino que el consumo de energía de este tipo de dispositivos. Consumen mucha energía como para operar con baterías por un largo periodo de tiempo, por lo que al ser utilizado de manera continua puede llevar a requerir la utilización de varias baterías, o verse en la necesidad de

recargar el sistema de manera constante. Aquí es donde las redes LPWAN cobran un papel muy importante, permitiendo la conectividad de hasta un rango de 15 kilómetros y a un bajo costo de consumo de energía.

Es importante mencionar que hasta hoy, el estudio de las LPWAN aplicadas a sistemas de telemedicina es un área de investigación abierta. En este trabajo se propone evaluar la tecnología LPWAN para una aplicación de monitoreo de adultos mayores dado que cuenta con características interesantes que permiten inferir que pueden ser utilizadas para este tipo de aplicaciones. Las características son:

- Largo alcance: Puede ser utilizado en ambientes urbanos e interiores, permitiendo conectividad a dispositivos que se encuentran a más de 1 kilómetro de distancia.
- Bajo consumo de energía: permite la utilización de baterías hasta un tiempo de vida de 5 años o más.
- Bajo costo: permite la reducción de inversión de infraestructura, al igual que gastos de operación, y gasto de nodos finales.

Con el presente trabajo se espera contribuir a demostrar que las tecnologías LPWAN pueden jugar un papel muy importante en aplicaciones de telemonitoreo de baja tasa de datos, como puede ser enviar información de sensores de ritmo cardiaco, temperatura, localización o detección de caídas. Actualmente, ya existen en el mercado soluciones que se enfocan en la utilización de tecnologías como IEEE 802.15.4 y red celular, como se mencionó anteriormente, cada una cuenta con desventajas que dan entrada a evaluar las nuevas tecnologías que han sido presentadas, como en este caso LPWAN.

### **1.3. Objetivo General**

Determinar el desempeño de la tecnología LPWAN en un escenario en donde se transmita una señal de auxilio y una señal de posicionamiento en un área de cobertura extendida. Se evaluará la tecnología basado en factores como pérdida de paquetes, consumo de energía y rango de cobertura, generando recomendaciones de diseño. La evaluación de desempeño se realizará mediante implementación y experimentación.



## 1.4. Objetivos Particulares

- Evaluar por medio de simulación o emulación las prestaciones ofrecidas por una de las tecnologías emergentes para LPWANs para un escenario de telemonitoreo de variables fisiológicas con bajas tasa de datos en un área de cobertura extendida.
- Integrar un sistema de posicionamiento burdo basado en Bluetooth Low Energy (BLE) de tal manera que se pueda estimar la posición del usuario en interiores.
- Determinar el consumo de energía y compararlo con otras propuestas en la literatura para la detección y aviso en caso de emergencias.
- Generar recomendaciones de diseño e implementación basados en los resultados obtenidos.

## 1.5. Metodología

### **Definición de la información a transmitir.**

Dado a lo que se presenta en este trabajo puede llegar a ser utilizado en el establecimiento de redes inalámbricas de sensores enfocadas en telemonitoreo de adultos mayores, se definieron las principales características de la información a transmitir en términos del perfil de tráfico. En particular la información más relevante en aplicaciones enfocadas en telemonitoreo de adultos mayores, es decir, localización y detección de caídas.

### **Estudio bibliográfico de las redes inalámbricas consideradas.**

Se estudiaron las principales características técnicas de las tecnologías consideradas: LPWAN, IEEE 802.15 y redes celulares. La finalidad de este estudio es contar con los elementos suficientes para determinar las características que debe de poseer el dispositivo enfocado en localización, rastreo y detección de caídas.

### **Diseño de la cama de pruebas experimental.**

Se diseñó la arquitectura de red y el sistema inmerso que permitiera implementar el algoritmo de localización y comunicarse con los diferentes radios de las tecnologías seleccionadas para comparar.

### **Implementación de la cama de pruebas**

Una vez que fueron analizados los bloques necesarios para la evaluación de LoRa a través de comparar su desempeño con el de IEEE 802.15.4 y una tecnología celular, se eligieron los componentes necesarios para la transmisión de la información, tomando en cuenta la arquitectura de la red para cada una de las

tecnologías seleccionadas. En esta etapa se definió el microprocesador a utilizar, los buses seriales requeridos para la comunicación con los radios y el software de desarrollo.

### **Evaluación de desempeño de la cama de pruebas experimental**

Se realizaron las pruebas pertinentes para observar el funcionamiento de las tecnologías a evaluar. Se obtuvieron métricas que sirven como base para la implementación de la red en escenarios específicos que permiten determinar que tecnología cuenta con las mejores características para esta aplicación en particular.

### **Análisis de resultados.**

Tomando como base los resultados obtenidos, se realizó una comparación objetiva del desempeño de LoRa, en términos de consumo de energía y paquetes perdidos, con IEEE 802.15.4 y la red celular GSM.

## **1.6. Organización de la Tesis**

En el capítulo 2 se muestra un estudio de las principales arquitecturas comúnmente utilizadas en escenarios de localización, rastreo y detección de caídas. Se revisó la literatura para determinar las técnicas de estimación de distancias, algoritmos de localización y algoritmos de detección de caídas.

En el capítulo 3 se muestran las principales características de las tecnologías inalámbricas a evaluarse en el escenario mencionado en el capítulo anterior (IEEE 802.15.4, LoRa y telefonía móvil (GSM)). Se estudiaron los estándares de estas tres tecnologías y se obtuvo información esencial para realizar el diseño de las redes.

En el capítulo 4 se presenta el diseño de la cama de pruebas experimental para localización de pacientes, en la cual se describe la arquitectura propuesta junto con la selección de los módulos transceptores que fueron utilizados, así como sus características y limitaciones. A su vez, se muestra la implementación del algoritmo de localización seleccionado junto con la descripción de la tecnología utilizada (Bluetooth Low Energy).

En el capítulo 5 se discute la implementación experimental de la cama de pruebas experimental, en la cual se implementarán las tecnologías a ser evaluadas. Se muestra la descripción de los escenarios de prueba experimental y los parámetros a medir: consumo de energía, movilidad y cobertura.

En el capítulo 6 se presentan los resultados de la evaluación de desempeño de las distintas tecnologías bajo los escenarios de prueba experimental.

Para finalizar, en el capítulo 7 se muestran las discusiones, conclusiones y trabajo a futuro que surgen como fruto de este trabajo de investigación.



## Capítulo 2. Sistemas para localización y detección de caídas

---

### 2.1. Introducción

Dos de los elementos más importantes en los sistemas de monitoreo remoto de adultos mayores son el módulo de localización y el módulo de detección de caídas. Conocer la información sobre la posición de un objeto o persona puede ser indispensable para diferentes aplicaciones del cuidado de la salud de adultos mayores, por ejemplo, detectar actividades y movilidad. Para este fin, es necesario habilitar sistemas de localización en interiores y exteriores para brindar servicios de localización, rastreo y monitoreo. En este contexto, los sistemas de posicionamiento global (GPS, “*Global Positioning Systems*”) son ampliamente utilizados para ambientes de exteriores (Liu, Darabi, Banerjee, & Liu, 2007). Sin embargo, en ambientes de interiores no es posible utilizar el posicionamiento basado en GPS debido a que se tiene una cobertura pobre de señales satelitales (Rashidi & Mihailidis, 2013).

Por lo tanto, para poder habilitar aplicaciones de monitoreo remoto de adultos mayores, además del uso de GPS, es necesario considerar también sistemas de posicionamiento en interiores. Para este fin, es común el uso de tecnologías inalámbricas como Wi-Fi o Bluetooth para habilitar un sistema basado en el análisis de la propagación de las señales inalámbricas. El receptor inalámbrico “escucha” las transmisiones periódicas de nodos cuya posición es conocida previamente y utiliza los fenómenos de propagación (p.ej. atenuación) para inferir la distancia hacia la referencia conocida.

Por otro lado, los sistemas de detección de caídas generalmente son implementados utilizando la información de sensores inerciales, p.ej. acelerómetro, como los presentados en Lai et al (Lai, Chang, Chao, & Huang, 2011). En este capítulo se revisarán las arquitecturas para el monitoreo de adultos mayores más relevantes encontradas en la literatura.

### 2.2. Arquitecturas comúnmente utilizadas

En esta sub-sección, se presenta una revisión de trabajos en el estado del arte de sistemas para localización y rastreo de adultos mayores en escenarios de telemonitoreo, en particular se revisa la arquitectura de red del sistema utilizado. Para la revisión, se optó por dividir la clasificación de los trabajos en dos tipos: sin detección de caídas y con detección de caídas.

### 2.2.1. Sin detección de caídas

En Solanas et al. (Solanas, Martínez-Balleste, Pérez-Martínez, Peña, & Ramos, 2013). Se propone una aplicación que es ejecutada en teléfonos inteligentes y permite el monitoreo de personas. Se enfocan en pacientes diagnosticados con MCI y estados tempranos de demencia. Hacen uso de un conjunto de estados de alarmas asociadas a geo cercas definidas con ayuda de un GPS para facilitar la búsqueda y ayuda de pacientes que se encuentran perdidos. Este sistema está hecho para exteriores dado que utiliza la tecnología GPS para estimar la localización. Ejecuta dos principales tareas:

- Administrativas: tareas relacionadas con el registro de usuarios al sistema, administración de claves de encriptación.
- Monitoreo: se enfocan en el análisis de la información de localización (con la posibilidad de añadir más variables) con el enfoque de detectar situaciones que pongan en peligro la seguridad de la persona.

De acuerdo a las pruebas realizadas con la implementación física del sistema en un teléfono inteligente se obtuvo una autonomía del sistema de 62.5 horas, enviando mensajes de localización cada 5 minutos a través de telefonía móvil mediante una arquitectura sobre HTTP.

En el trabajo de Marco et al. (Marco et al., 2008) se presenta un sistema basado en ZigBee y ultrasonido, y lo clasifican como un sistema de posicionamiento local de alta precisión y bajo costo. Además integran un servicio de alarmas en caso que la persona se encuentre en una situación de riesgo. El sistema está enfocado en el cuidado de adultos mayores y personas con discapacidad. En cuanto al sistema de localización, se utiliza ZigBee (radiofrecuencia) y ultrasonido para medir la distancia entre los dispositivos móviles y los dispositivos faros (posición previamente conocida). Se propone una arquitectura de red tipo malla dado que cumple con los requerimientos para su sistema: dispositivos móviles, flexibilidad de ruteo y robustez en caso de que falle un enrutador. Para estimar la localización, utilizan el algoritmo LMS (*“Least Median of Squares”*).

Por otro lado, Faragher et al. (Faragher & Harle, 2015) proponen un sistema de localización basado en la tecnología Bluetooth Low Energy (BLE). Este trabajo no tiene el enfoque de monitoreo de adultos mayores, sino se enfocan en la factibilidad de utilizar BLE para aplicaciones de localización en interiores. Faragher et al. realizaron la evaluación de un sistema BLE en conjunto de señales faro BLE distribuidas a través del escenario de localización y llevaron a cabo la comparación con un sistema similar basado en Wi-Fi. Faragher et al. implementaron un algoritmo de localización basado en mediciones de la potencia de la

señal recibida (RSS, "*Received Signal Strength*"). Muestran que con un sistema de posición basado en BLE es posible obtener una mejora significativa en la precisión sobre sistemas basados en WiFi. Específicamente, para BLE se obtiene un error menor de 2.6 m utilizando un faro por 30 m<sup>2</sup> y un rango de error menor a 4.8 m utilizando un faro por 100 m<sup>2</sup>, mientras que al utilizar un sistema de WiFi se obtiene un rango de error menor a 8.5 metros ambos con un intervalo de confianza de 95%. De esta manera, muestran que BLE puede utilizarse en aplicaciones de localización basadas en interiores. Adicionalmente, frente a Wi-Fi, BLE requiere un consumo de energía menor.

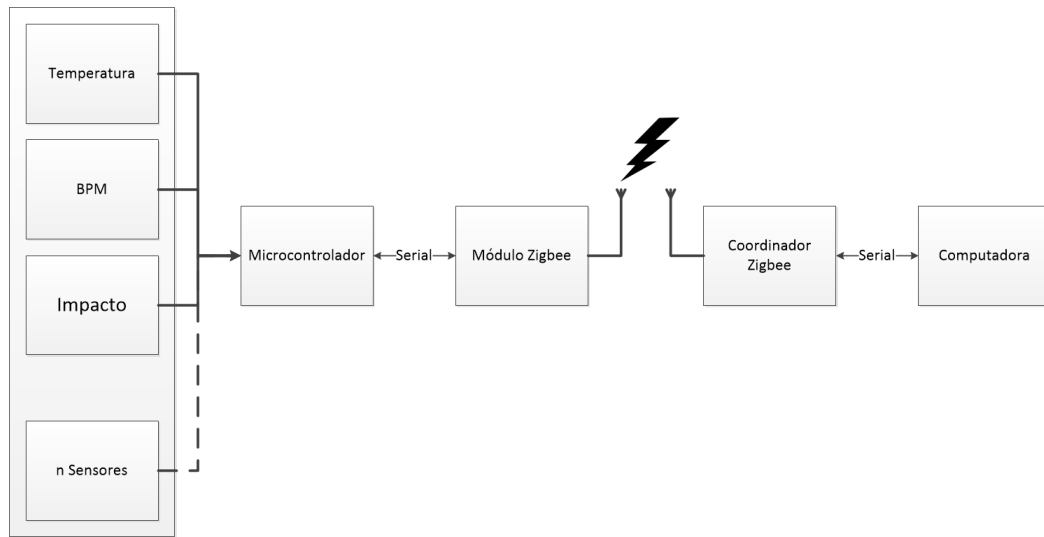
### **2.2.2. Con detección de caídas**

La arquitectura propuesta por Kau et al. (Kau & Chen, 2015) utiliza un teléfono celular como plataforma de su sistema. Proponen un sistema de detección de caídas mediante la utilización de una máquina de estados. El sistema se implementa en un teléfono celular con red celular de tercera generación. Para el algoritmo de detección de caídas hacen uso del acelerómetro de tres ejes y una brújula eléctrica. Al detectar un evento de caída, la posición de la persona es adquirida mediante GPS y se envía un mensaje de auxilio hacia un coordinador central a través de la red de telefonía móvil 3G. Además, se propone una arquitectura de clasificación en cascada para disminuir el procesamiento computacional y el consumo de energía del teléfono celular. Por otro lado, obtuvieron una precisión de detección de caídas hasta un 92% en la sensibilidad y un 99.75% en la especificidad para un conjunto de 9 actividades.

Por otra parte, Redondi et al. (Redondi, Chirico, Borsani, Cesana, & Tagliasacchi, 2013) propusieron un sistema llamado LAURA, el cual se enfoca en la localización, rastreo y monitoreo de pacientes dentro de institutos de enfermería a través de una red inalámbrica de sensores. El sistema se compone de tres bloques: localización por medio de muestras de RSS, algoritmos de clasificación de movimiento y rastreo a través de un filtro de partículas. El sistema de monitoreo personal está basado en sensores inerciales para clasificar los movimientos del paciente y poder detectar situaciones de peligro (p.ej. caída de la persona). Adicionalmente tiene un módulo de comunicación inalámbrica basado en IEEE 802.15.4 que genera una topología tipo árbol. La implementación física del sistema se realizó utilizando hardware comercial. En relación a los resultados, obtuvieron un promedio de error de localización menor a 2m para el 80% de los casos y precisión de clasificación de movimientos de hasta 90%. El algoritmo de localización usado fue REMA ("*Ranging using Environment and Mobility Adaptive RSSI*"). Para los objetos en movimiento se utilizó filtrado de partícula, el cual une las mediciones de RSSI con un modelo dinámico que

toma en cuenta el patrón de movimiento de personas en ambientes de interiores. Por último, se evaluaron los parámetros de precisión de localización, consumo de energía y carga de tráfico.

Por otro lado, Malhi et al. (Malhi, Mukhopadhyay, Schnepfer, Haefke, & Ewald, 2012) realizaron el diseño y desarrollo de un sistema no invasivo de monitoreo de signos vitales, tales como temperatura y ritmo cardiaco y cuenta con un sensor de impacto que es utilizado para detección de caídas. El sistema consiste en un dispositivo que se coloca en la muñeca y un dedo. Si el dispositivo detecta que la persona tiene un problema o está herida, envía una señal de alerta para solicitar la atención médica necesaria. Todo el sistema está energizado por una batería alcalina de 9V. La información es enviada a través de una arquitectura de red tipo estrella mediante la utilización del protocolo ZigBee. Se realizaron pruebas con varios movimientos como caminar, sentarse, escribir, etc. para observar la señal de salida del acelerómetro y así detectar cuando ocurre un evento de caída. En la Figura 1 se muestra el diagrama a bloques del hardware utilizado para el sistema.



**Figura 1.** Diagrama a bloques del sistema.

### 2.3. Técnicas de estimación de distancias

Las técnicas de estimación de distancias se utilizan principalmente para determinar la separación entre nodos para así poder realizar una estimación aproximada de la posición de un nodo de interés. Para ello, se han desarrollado las técnicas siguientes:

- Tiempo de llegada.
- Ángulo de llegada.



- Diferencia de tiempos de llegada.
- Fuerza de la señal recibida.

En función de la precisión requerida y las restricciones del sistema, se pueden estimar diferentes parámetros. Por lo general, estos parámetros se encuentran relacionados con la potencia, dirección y/o tiempo de vuelo de una señal recibida. En las siguientes subsecciones se describen brevemente las técnicas más relevantes.

### 2.3.1. Tiempo de llegada

La técnica de tiempo de llegada (ToA, "*Time of Arrival*") utiliza el tiempo que le toma la señal viajar desde el transmisor hasta el receptor. Para poder localizar de manera adecuada con ToA es necesario por lo menos tener tres sensores (Dobbins, Garcia, & Shaw, 2011). Dado que se conoce la posición de los tres sensores se puede obtener la localización en la intersección de los tres círculos que se forman con cada uno de los sensores, tal como se muestra en la Figura 2. Se puede llegar a obtener mediciones imperfectas dado a que se pueden obtener regiones de incertidumbre entre los sensores.

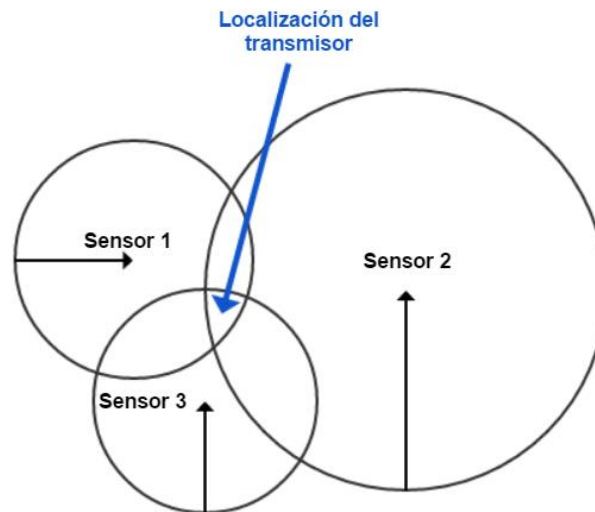


Figura 2. Tiempo de llegada.

Dado que ToA depende de la diferencia entre el tiempo de arribo y el tiempo de partida, es necesario que todos los receptores y transmisores estén sincronizados para evitar errores en la diferencia dados por desplazamientos de sus relojes. Además, se obtienen posibles retardos dado al hardware utilizado para calcular las distancias entre los dispositivos.

### 2.3.2. Ángulo de llegada

La técnica Ángulo de llegada (AoA, "*Angle of Arrival*") hace uso de varias antenas de forma que sea posible inferir el ángulo de llegada de la señal (Figura 3). Después de esto, se realiza la estimación de la localización mediante la triangulación de estos ángulos. Este tipo de sistemas suelen ser bastante precisos, pero no cualquier dispositivo posee un arreglo de antenas por lo que sería necesario agregar hardware adicional para llegar a su implementación.

Otro inconveniente que presenta esta técnica, es que solo resulta efectiva para el caso de transmisiones donde no se produzcan multitrayectorias (Dobbins et al., 2011). En caso contrario, cuando un dispositivo recibe la señal puede inferir que la señal proviene de otro lugar al medir el ángulo de la señal reflejada.

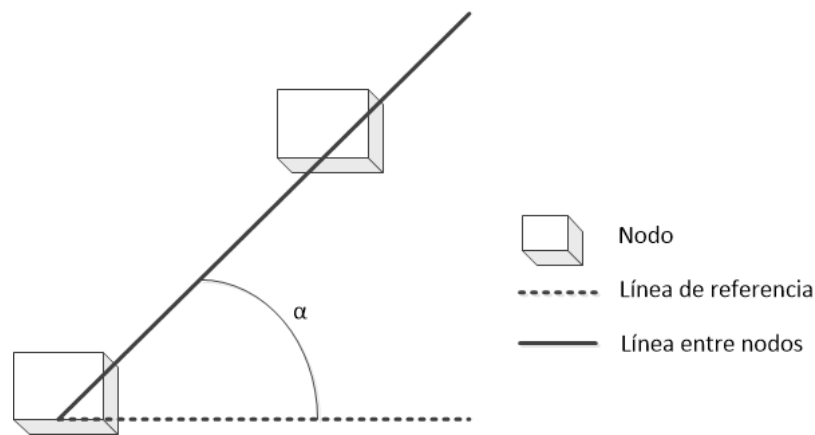


Figura 3. Ángulo entre nodos.

### 2.3.3. Diferencia de tiempo de llegada

La diferencia de tiempo de llegada (TDoA, "*Time Difference of Arrival*") utiliza multilateración o posicionamiento hiperbólico para localización del objeto. Es similar a ToA dado que utiliza el tiempo de viaje de la señal transmitida hasta el receptor para estimar la distancia, pero en lugar de utilizar el tiempo de viaje de la señal de cada sensor hace uso de la diferencia para encontrar la distancia entre cada uno dando como resultado varias hipérbolas en donde la intersección entre ellas es la localización del transmisor (Swaran & S.N., 2013). De manera similar a ToA o cualquier otro método basado en tiempo se debe tener sincronía para realizar mediciones.

### 2.3.4. Fuerza de la señal recibida

La técnica de la fuerza de la señal recibida analiza la atenuación de la señal recibida, causada por los fenómenos de propagación, para inferir la localización del nodo con posición desconocida. Con base en

esta atenuación se puede estimar la distancia que separa los nodos. Es pertinente comentar que la relación distancia/potencia de la señal recibida no es un valor estable y lineal. Por lo que es necesario considerar, en conjunto con un modelo de pérdidas por trayectoria, los desvanecimientos ocasionados por obstáculos (p.ej. paredes) para realizar estimaciones de distancia.

En ambientes de interiores una señal que viaja de un nodo a otro, experimenta desvanecimiento rápido en múltiples trayectorias, pérdidas en su recorrido y, además, se ve afectada por el efecto de las sombras que originan los diferentes objetos. En la práctica, el efecto de multitrayectorias puede ser mitigado utilizando métodos de espectro ensanchado como DSSS (*“Direct Sequence Spread Spectrum”*) o FHSS (*“Frequency Hopping Spread Spectrum”*), que promedian la potencia de la señal recibida sobre un amplio rango de frecuencias, evitando así el desvanecimiento selectivo en frecuencia que es ocasionado por multitrayectorias.

La ventaja de esta opción es que no requiere de hardware adicional dado que la toma de mediciones de la potencia de la señal se obtiene directamente del transceptor de radio hardware como de energía, por lo que no es necesario envío de paquetes adicionales. Lo anterior permite que esta técnica sea un método muy atractivo e interesante para su implementación en una amplia gama de aplicaciones.

## 2.4. Algoritmos de localización

Los algoritmos de localización necesitan de las técnicas de estimación de distancia como las que se mencionaron previamente, para así determinar la posición relativa del nodo de interés (NOI, *“Node Of Interest”*) respecto del nodo ancla.

Dichos algoritmos de localización se clasifican principalmente en dos clases: basados en distancia y libres de distancia (Espinoza et al., 2016). Las técnicas basadas en distancia requieren calcular la distancia entre un grupo de nodos para poder estimar la posición del NOI. Algunos ejemplos de éstos son: multilateración, MDS (*“Multidimensional Scaling”*), sistemas de posicionamiento Ad-hoc, algoritmos de posicionamiento circular e hiperbólico (Han, Xu, Duong, Jiang, & Hara, 2013). Las técnicas libres de distancia son aquellas que estiman la posición del NOI mediante la fuerza de la señal recibida. Algunos ejemplos de algoritmos que utilizan esta técnica son: DV-HOP, APIT (*“Approximate Point In Triangle”*), Centroides, Intersección rectangular, Intersección circular, entre otras. (Cheng et al., 2012)

Con la finalidad de evaluar la arquitectura de red propuesta y como prueba de concepto, además del posicionamiento basado en GPS, en este trabajo se decidió implementar un algoritmo de posicionamiento para interiores. El algoritmo seleccionado se llama algoritmo de Localización por Centroide Ponderado (WCL, “*Weighted Centroid Localization*”), el cual en Vargas et al (Vargas, Mass, Espinoza, & Ruiz, 2015) al ser comparado contra otros algoritmos de posicionamiento mostró un mejor desempeño en términos de la precisión en las mediciones. El algoritmo WCL utiliza la técnica de estimación de distancia basada en la fuerza de la señal recibida. Como se mencionó en la sección 2.3.4, con la técnica basada en RSSI no es necesario realizar procesamiento extra dado que la mayoría de los receptores de BLE obtienen el RSSI cada vez que reciben un paquete de otro nodo BLE. A continuación, se explica brevemente el algoritmo WCL utilizado en este trabajo.

#### 2.4.1. Centroide

La localización por centroide (CL, “*Centroid Location*”) ha sido propuesta como un método eficaz de localización dado que delimita la fuente de transmisión de un mensaje de las coordenadas  $(x_i, y_i)$  obtenidas al promediar las coordenadas de todos los dispositivos receptores que se encuentran dentro de su alcance.

Las coordenadas estimadas del NOI a localizar se indican como  $p = (x, y)$ , en donde cada emisor  $R_i$  esta situado en un punto de coordenadas previamente conocidas  $p_i = (x_i, y_i)$ . La aproximación de las coordenadas  $x$  se calcula a partir de todas coordenadas  $x_i$  de los receptores, y las coordenadas  $y$  se calculan a partir de las coordenadas  $y_i$ . Entonces dado un conjunto de puntos  $p_i$  conocidos en el espacio euclidiano, por ejemplo, un número de receptores que se encuentren dentro del alcance del transmisor, se puede realizar el cálculo de la ubicación aproximada  $p$  de un nodo desde el centroide de los puntos conocidos  $p_i$  mediante la ecuación 1.

$$p = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n p_i \quad (1)$$

Donde  $n$  = número de puntos dentro del alcance.

#### 2.4.2. Centroide Ponderado

El algoritmo WCL consiste en la asignación de un peso a cada una de las coordenadas del receptor, el cual es inversamente proporcional a la distancia del dispositivo transmisor. Este esquema tiene como objetivo mejorar la precisión de localización mediante la asignación de un mayor peso a los puntos que se estiman

están más cerca del objetivo y menor peso a los puntos más lejos. El centroide ponderado se calcula utilizando las siguientes ecuaciones:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n w_i * p_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

$$w_i = \frac{1}{(d_i)^g} \quad (3)$$

Donde:

$d_i$  es la distancia conocida entre el nodo destino y el punto  $p_i$ .

$g$  es el grado en que los puntos remotos participan en la estimación de la posición.

## 2.5. Algoritmos de detección de caídas

Comúnmente la detección de caídas está basada en umbrales de aceleración, lo cual requiere un monitoreo continuo de los datos del sensor con umbrales previamente definidos. Uno de los algoritmos más simples consiste en detectar solo el pico de impacto al llegar la persona al piso en una caída.

Otra técnica más compleja consiste en tomar en cuenta las etapas típicas antes, durante y después de una caída. Para este caso, se utilizan varios umbrales que deben de cumplirse en una secuencia particular y en ciertos periodos para detectar el evento de caída. Este tipo de sistemas son confiables dado que generan una baja tasa de falsos positivos, sin embargo, la detección se ve degradada cuando la dirección de caída cambia o cuando se incluye rotación durante el transcurso de caída. Incluso cuando la persona realiza movimientos de giro o balanceo con su cuerpo y estos deben ser detectados como evento de caída (Rashidi & Mihailidis, 2013a).

A continuación se describen algunos de los algoritmos de detección de caídas considerados en este trabajo.

### 2.5.1. Detección del pico de aceleración

Los parámetros que se tienen en cuenta son: Magnitud máxima del vector de aceleración, calculada mediante la ecuación 4, considerando vectores mutuamente ortogonales entre sí en los ejes X, Y y Z. Todo movimiento brusco, entre ellos las caídas, producen cambios transitorios de magnitud pronunciada del orden de 12 veces la aceleración de la gravedad, las cuales pueden ser detectadas con la magnitud pico del vector de aceleración (Mubashir, Shao, & Seed, 2013)

$$|a| = \sqrt{ax^2 + ay^2 + az^2} \quad (4)$$

El umbral de aceleración pico puede ser configurado basado en datos empíricos. Las actividades de la vida diaria usualmente no exceden 3g, pero de vez en cuando puede ser mayor durante algunos movimientos bruscos como correr, saltar o sentarse rápidamente. Debido a la existencia de algún solapamiento para los rangos de aceleración de caídas, se requiere otra forma de distinguir las caídas de las actividades de la vida diaria para obtener un algoritmo más robusto.

Dado que los eventos de caídas son cortos, la duración del pico de aceleración también puede ser un parámetro determinante para distinguir una caída de otros eventos.

### 2.5.2. Detección de la colisión

Se puede implementar un sistema de detección de caídas basándose en la colisión (Delahoz & Labrador, 2014), midiendo el valor relativo del incremento de aceleración. Si en un cierto intervalo de tiempo la aceleración aumenta más de una cierta cantidad, se considera colisión.

Estos algoritmos lo que hacen es: para los  $n$  últimos valores comprueba si el incremento de aceleración es mayor que cierto valor, considerando el umbral de incremento de aceleración.

### 2.5.3. Detección de las etapas de caídas

Este algoritmo toma en cuenta los distintos estados de la persona antes, durante y después de una caída (Zhu et al., 2015). A continuación se describen los estados:

- **Reposo y orientación inicial:** Antes de la caída, la persona puede encontrarse en estado de reposo (acostado, parado, etc.) o realizando actividades de la vida diaria (caminar, correr, sentarse, etc.). Estas actividades involucran magnitudes de aceleración bajas del orden de los 3g o menos y por un tiempo prolongado. Antes del suceso de caída, la orientación de la persona suele ser vertical. Esta orientación puede ser detectada usando un acelerómetro para compararla con la orientación final luego de sufrir la caída.
- **Caída libre:** Esta etapa hace referencia al momento inicial de toda caída, donde el cuerpo se dirige hacia el suelo experimentando una aceleración vertical semejante a la gravedad. En esta etapa la suma vectorial de las aceleraciones disminuye de 1g hasta 0g. Toma en cuenta dos parámetros:
  - Magnitud de la aceleración del cuerpo con respecto a la aceleración estática de la gravedad.

- Duración típica de la caída libre: considerando como única fuerza importante la gravedad, depende de la altura.
- Impacto: después de la etapa de caída libre, el cuerpo choca contra el suelo u otros objetos, dando como resultado un elevado pico entre 2g y 12g en la suma de los tres ejes debido a la elevada desaceleración del cuerpo. El impacto se define a partir de dos parámetros:
  - Magnitud pico.
  - Duración.
- Reposo: Tras un impacto, un cuerpo se mantiene en estado de reposo durante un tiempo determinado. Este tiempo puede ser muy elevado si el paciente se encuentra inconsciente, pero normalmente es menor a 10 segundos. La posición final de la persona después de una caída, generalmente no coincide con la posición inicial, considerando que las caídas se producen desde una postura vertical y terminan en una postura horizontal. El tiempo de inactividad permite detectar si la persona ha quedado inconsciente.
- Posición final: Tras una caída, el cuerpo queda en una posición diferente a la inicial.

#### **2.5.4. Detección de postura antes y después del pico de aceleración**

Este algoritmo toma en cuenta la postura inicial de la persona (por lo general, de pie), para después detectar el pico de aceleración dado al impacto cuando la persona llega al suelo, y finalmente, detectar un cambio de postura cuando la persona termina tendida en el suelo (Delahoz & Labrador, 2014). Sin embargo, el criterio de la postura no es determinante para identificar una caída ya que puede ocurrir que la persona caiga sentada, o apoyada contra una pared, manteniendo así el torso en posición vertical.

## **2.6. Discusión**

En este capítulo se presentaron las propuestas de arquitecturas de red en el estado del arte que son utilizadas en sistemas de localización, rastreo y detección de caídas. En su mayoría se encontró que estas propuestas utilizan una arquitectura tipo estrella. Adicionalmente, se observó que la red celular es ampliamente utilizada como tecnología de comunicación para enviar la información de localización, rastreo y/o detección de caídas. La ventaja de utilizar un teléfono inteligente como medio de comunicación es que hoy en día se tiene amplia cobertura en ciudades, por lo que no es necesario instalar más infraestructura. La desventaja recae que este tipo de sistemas cuentan con poco tiempo de vida de sus baterías, es decir, requieren de recargarse cada día, incluso dos veces por día, lo cual puede llegar a ser

cansado para el usuario y lleva a que el mismo deje de utilizar el sistema. Otra desventaja es el costo que conlleva mantener el envío de información a través de la red celular, aunque no es mucho el tráfico generado, pero con el tiempo este podría verse reflejado como un alto gasto. Otra tecnología ampliamente usada en este tipo de sistemas es IEEE 802.15.4, la cual ya tiene muchos años siendo utilizadas en redes inalámbricas de sensores de bajo costo. La desventaja de utilizar esta tecnología es su cobertura, que teóricamente puede llegar hasta 100 metros, aunque en realidad dependerá del radio utilizado, y entre más potencia utilice el radio para transmitir mayor será el consumo de energía del mismo. Para lo cual, esta tecnología hace uso de mecanismos de traspasos, el cual se encarga de realizar la comunicación entre varios coordinadores dentro de la red. De esta manera se puede atacar el problema de cobertura, pero lleva a la desventaja de que se requieren más recursos de la red, esto por la cantidad de mensajes que requieren ser enviados para comunicar un coordinador con otro. Además, se debe tomar en cuenta un protocolo de enrutamiento para conocer la ruta que recorrerá el paquete de información, y todo esto recae en mayor consumo de energía, por lo que se tiene la misma desventaja que utilizar la red móvil celular. Por lo anterior, se propone la utilización de LoRa que utiliza una red estrella, por lo que los mensajes de los dispositivos finales van directamente hacia el coordinador de la red, y gracias a su esquema de modulación es que puede enviar información hasta una decena de kilómetros. En el siguiente capítulo se detallará más a fondo las capacidades de estas tres tecnologías.

Por otro lado, de las técnicas de estimación de distancias mostradas en este capítulo, se puede observar que cada una tiene ventajas y desventajas. Incluso se puede realizar la combinación de varias técnicas para lograr una mejor precisión de localización. En este trabajo de investigación, para la prueba de concepto, se decidió utilizar la técnica de Fuerza de la Señal Recibida por la ventaja que no requiere la utilización de hardware adicional dado que la mayoría de los transceptores cuentan con la capacidad de entregar la información de RSSI. Dicha técnica es la base para el algoritmo de localización WCL, seleccionado en este trabajo. Es importante mencionar que, a pesar de que la combinación de diferentes técnicas pudieran mejorar la precisión de la estimación de posición, este trabajo no tiene el objetivo de evaluar el algoritmo de localización, sino más bien el trabajo se enfoca en generar la carga útil que enviarán las diferentes tecnologías que serán evaluadas en escenarios de monitoreo remoto de adultos mayores.

Respecto a los algoritmos de detección de caídas, de la revisión de la literatura se observó que la mayoría de los algoritmos solo envían una alerta cuando una caída es detectada. Es decir, el desempeño de los algoritmos de detección de caídas no depende de la comunicación con otros nodos, y solo envían un paquete de alerta cuando es necesario. Por lo tanto, en este trabajo de tesis se decidió emular la detección de caídas incluyendo un campo en la carga útil del paquete para indicar si hubo o no una caída.



Adicionalmente, se configuró un puerto general de entrada del sistema de procesamiento seleccionado (ver subsección 4.2.1.) para que al recibir una interrupción proveniente de un botón, disparara el envío de un mensaje de alerta.



## Capítulo 3. Tecnologías de redes inalámbricas para el sistema de localización y monitoreo

---

### 3.1. Introducción

Tradicionalmente las redes móviles (p.ej. red celular) han dominado el mercado de conectividad en servicios y sistemas de área amplia. Los avances tecnológicos en el manejo de semiconductores han permitido la miniaturización de dispositivos electrónicos y disminuido el consumo de potencia de los mismos, estos avances han abierto un nuevo campo de oportunidad para las comunicaciones inalámbricas: el de redes de cobertura amplia de baja potencia (LPWAN por sus siglas en inglés) con baja tasa de datos.

Las LPWAN ofrecen diferentes ventajas con respecto a otro tipo de redes de baja tasa de datos (p. ej. ZigBee), entre las más importantes están: bajo consumo de energía y bajo costo y largo alcance. Por lo tanto, con las LPWAN es posible habilitar una gama más amplia de aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés), actualmente limitadas en relación al costo y el radio de cobertura del transceptor de radio. Las LPWAN compiten y colaboran con las tecnologías móviles y de redes inalámbricas de sensores para incrementar las opciones de conectividad a los usuarios finales. Actualmente, diversas tecnologías de comunicación inalámbrica (p. ej. IEEE 802.15.4, IEEE 802.11, Bluetooth) han sido propuestas para habilitar redes de sensores de área corporal en escenarios de telemonitoreo (Hussain, Wenbi, Lopes, Nadher, & Mudhish, 2015; Redondi et al., 2013)(Kam, Suryadevara, Mukhopadhyay, & Gill, 2014)(Moreno, Hernando, Member, & Enrique, 2015).

Al momento de realización de esta tesis, aún no existen esfuerzos reportados en la literatura para el despliegue de redes de sensores de monitoreo utilizando la tecnología LPWAN. Por lo tanto, una de las principales aportaciones de este trabajo de investigación es el evaluar el desempeño de redes LPWAN (a través del estándar LoRa) para ser utilizadas en el diseño de un sistema de localización y monitoreo de adultos mayores.

Para obtener una referencia del desempeño del estándar LoRa-LPWAN, y considerando la revisión de la literatura realizada en el capítulo anterior (ver Sección 2.6), en este trabajo se propone comparar de manera cualitativa y cuantitativa el desempeño de LoRa con el del estándar IEEE 802.15.4, y el de la telefonía móvil (GSM) para enviar la información de localización y monitoreo hacia un resumidero de información. En este capítulo se describen las características de operación más relevantes de las tres tecnologías de red como base para la comparación cualitativa de las mismas.

### 3.2. Long Range (LoRa)

LoRa es una especificación de una red LPWAN propuesta por LoRa Alliance (Sornin, Luis, Eirich, Kramp, & Hersent, 2015) y pensada para comunicar dispositivos de bajo costo y bajo consumo de energía alimentados por baterías. La especificación cubre la capa física y la de acceso al medio de la red, dejando a las aplicaciones el resto de las capas.

La comunicación entre los dispositivos y las estaciones base (nombradas gateways por la especificación) se basa en la modulación LoRa desarrollada por la compañía Semtech (Semtech, 2015a). Esta modulación permite enlaces de varios kilómetros inclusive en entornos urbanos, gracias a su presupuesto de enlace máximo de 155 dB, con una tasa de bit entre 0.3 kbps y 50 kbps.

En cuanto a las particularidades de la modulación LoRa, diferentes dispositivos emitiendo en la misma frecuencia, pero con tasa de bit distinta, no corrompen las transmisiones. Esto permite disponer de un amplio número de canales virtuales para la comunicación entre dispositivos finales y estación base. En la Figura 4 se muestra la pila de protocolos que utiliza LoRa.

<b>Aplicación</b>			
<b>LoRaWAN MAC</b>			
<b>Opciones MAC</b>			
<b>Clase A</b>	<b>Clase B</b>	<b>Clase C</b>	<b>-</b>
<b>Modulación LoRa</b>			
<b>Bandas de frecuencias por región</b>			
<b>EU 868</b>	<b>EU 433</b>	<b>NA 915</b>	<b>AS 434</b>

Figura 4. Pila de protocolos de LoRa.

#### 3.2.1. Arquitectura

La topología de red propuesta por LoRaWAN es estrella, es decir, los dispositivos finales se comunican directamente a un salto con una estación base de forma bidireccional half-duplex. Las estaciones base transmiten los datos de los dispositivos finales al servidor de red y viceversa utilizando una conexión IP estándar. En la Figura 5 se muestra la arquitectura utilizada en redes LoRa.

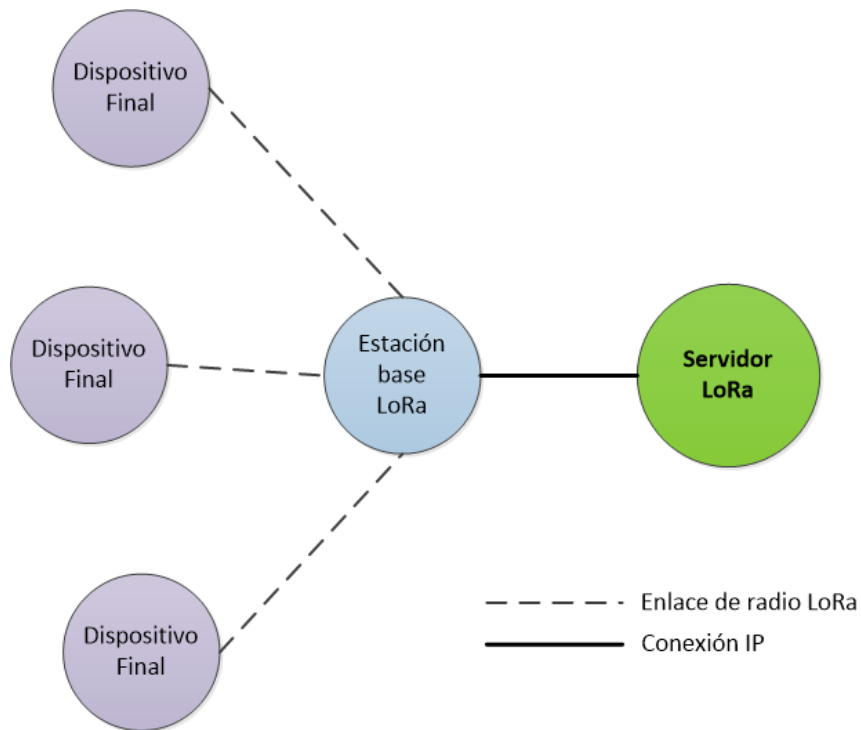


Figura 5. Arquitectura de red LoRa.

### Tipos de dispositivos

LoRaWAN define 3 clases de dispositivos, diseñados para distintas aplicaciones:

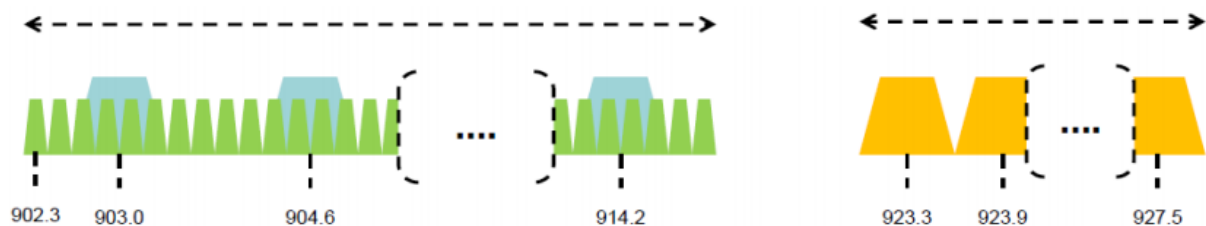
- **Clase A:** Permiten una comunicación bidireccional, con la limitación de que sólo puede recibir datos si ha enviado antes un paquete. Este tipo de dispositivos es el de menor consumo de la especificación, y sirve para aplicaciones en donde los dispositivos finales no requieren recibir información habitualmente. Todo dispositivo final debe implementar esta clase.
- **Clase B:** Esta clase añade la capacidad de recibir información sin necesidad de enviar paquetes, de esta manera la aplicación puede enviar datos a los dispositivos finales de manera calendarizada. Esto se consigue por medio del envío periódico de paquetes fano por parte de la estación base. Estos pueden negociar tiempos de recepción de paquetes desde la estación base al dispositivo final. Esta clase tiene un consumo mayor de energía en comparación de la clase A debido a la recepción periódica de los paquetes fano.
- **Clase C:** Este tipo de dispositivos están permanentemente escuchando el canal, y por tanto pueden recibir datos en cualquier momento, con excepción de cuando se encuentren enviando su información. Esta clase proporciona los mejores tiempos de respuesta y capacidad de envío desde el servidor a los dispositivos, al precio de un consumo de energía mucho mayor respecto a las otras dos clases.

### 3.2.2. Capa física

Es una nueva propuesta de capa física para redes LPWAN. Fue diseñada y patentada por la compañía Semtech. Opera en frecuencias libre de licencias que se encuentran disponibles en todo el mundo. Las bandas de frecuencias utilizadas son:

- 868 MHz para Europa.
- 915 MHz para Norte América.
- 433 MHz para Asia.

Al usar frecuencia por debajo de la banda ISM de 2.4 y 5.8 GHz permite obtener mejor cobertura, sobre todo en nodos que se encuentren dentro de un edificio. En México se utiliza la banda de 915 MHz, la cual cuenta con 64 canales de subida (0 al 63) y 8 canales de bajada (0 al 7). En la Figura 6 se muestran los canales de frecuencia.



**Figura 6.** Canales de radiofrecuencia del protocolo LoRa.

En cuanto a la modulación, LoRa utiliza una modificación de espectro esparcido propietaria en la que emplea un pulso que barre todas las frecuencias que opera, llamado chirp, para expandir el espectro de la señal. El factor de esparcimiento es elegido en cada dispositivo final y tiene influencia en el tiempo que toma transmitir un paquete. Esto permite alta sensibilidad para rango de largo alcance, mejor eficacia y disminuye las interferencias. El hecho que utilice solo bajas tasas de datos, significa que es requerido un bajo ancho de banda. Existe una variedad de anchos de banda disponibles: 7.8 kHz, 10.4 kHz, 15.6 kHz, 20.8 kHz, 31.2 kHz, 41.7 kHz, 62.5 kHz, 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz. El ancho de banda requerido puede ser seleccionado acorde a los requerimientos de los datos, al igual que de las condiciones del enlace.

Se realiza la implementación del algoritmo de tasa de datos adaptativo (ADR, "Adaptative Data Rate") que utiliza la relación señal ruido (SNR, "Signal-to-Noise Ratio") para determinar el nivel de potencia requerido. La potencia de transmisión es disminuida por debajo de la potencia máxima necesaria para de esta manera dar soporte a comunicaciones de alta velocidad y de esta manera se maximiza la vida de la batería.

La comunicación entre los dispositivos finales y las estaciones base hace uso de diferentes canales de frecuencia y tasa de datos. La tasa de datos depende del compromiso entre el rango de comunicación y la duración del mensaje de información, es decir, la tasa a la cual es enviada la información.

### **3.2.3. Capa MAC**

LoRaWAN es el nombre del protocolo de acceso al medio que fue diseñado para permitir la comunicación de dispositivos de bajo consumo con aplicaciones conectadas a Internet. Este protocolo se encuentra definido por LoRa Alliance.

Los nodos en una red LoRaWAN son asíncronos y se comunican cuando tienen información lista para ser enviada ya sea al ocurrir un evento o por su calendarización. Este tipo de protocolo es muy similar al método Aloha.

LoRaWAN incluye seguridad en dos niveles: encriptación de paquetes a nivel de red y a nivel de aplicación. De esta forma se protege la red de dispositivos maliciosos (primer nivel) y con el segundo nivel se protegen los datos de aplicación, de manera que los servidores de red no pueden leer los datos de cada aplicación. Para ambos se usa algoritmo de cifrado por bloques (AES, “*Advanced Encryption Standard*”) con claves de 128 bits de longitud basados en distintos identificadores del dispositivo, aplicación y red.

## **3.3. IEEE 802.15.4**

El estándar de telecomunicaciones IEEE 802.15.4 es una solución para redes inalámbricas de área personal de baja tasa de datos (LR-WPAN), la más reciente versión del estándar fue liberada en 2006. Una LR-WAN es una red sencilla y de bajo costo que permite conectividad inalámbrica en aplicaciones con requerimientos de bajo consumo de potencia (limitados en consumo) y caudal eficaz relativamente moderado (menor a 250 kbps). Los principales objetivos de las LR-WPAN son la facilidad de instalación, confiable transferencia de datos, bajo alcance de cobertura y bajo costo.

Este estándar fue creado para llenar el hueco existente en el campo de estándares inalámbricos de baja tasa para aplicaciones en redes de sensores. Los estándares existentes hasta el momento en el mercado estaban destinados a aplicaciones con mayores requisitos en cuanto a ancho de banda se refiere, como pueden ser videoconferencias o redes domésticas.

Algunas de las principales características que se definen en el estándar IEEE 802.15.4 son las siguientes:

- Tasas de datos pico: 250 kbps, 100 kbps, 40 kbps y 20 kbps.
- Topología estrella, igual-a-igual (peer-to-peer), malla y árbol.
- Latencia: Debajo de los 15 ms.
- Direcciones cortas de 16 bit o extendidas de 64 bit.
- Modo de operación con paquetes fijo y sin paquetes fijo.
- 16 canales en la banda de 2.4 GHz, 10 canales en la banda de 915 MHz y un canal en la banda de 868 MHz.
- Acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones (CSMA/CA) ranurado y no ranurado.
- Asignación opcional de ranuras de tiempo garantizadas (GTS) en el modo de operación paquetes fijo.
- Protocolo de acuse de recibo (ACK) para aplicaciones que requieren alta fiabilidad.

La tecnología inalámbrica basada en IEEE 802.15.4 permite comunicaciones de corto alcance con distancias de hasta 75 m y bajo consumo de energía; está diseñada para operar sobre bandas de frecuencia sin licencia. El estándar IEEE 802.15.4 define la capa PHY y la capa MAC para este tipo de redes, las cuales son usadas como base para protocolos que trabajan en capas superiores. Por lo general, IEEE 802.15.4 establece las capas PHY/MAC de un protocolo superior (e.g. ZigBee), en donde capas superiores son encargadas de proveer enrutamiento, topologías de mayor complejidad y otras funcionalidades que son de gran ayuda a la hora de desplegar redes de sensores inalámbricos a gran escala.

### 3.3.1. Arquitectura

La arquitectura definida en el estándar IEEE 802.15.4 clasifica a los nodos en dos tipos de dispositivos: dispositivo de funcionalidades complejas (FFD, *“Full Function Device”*) y dispositivo de funcionalidades reducidas (RFD, *“Reduced Function Device”*). Además de los tipos de dispositivos, también se definen tres modos de operación:

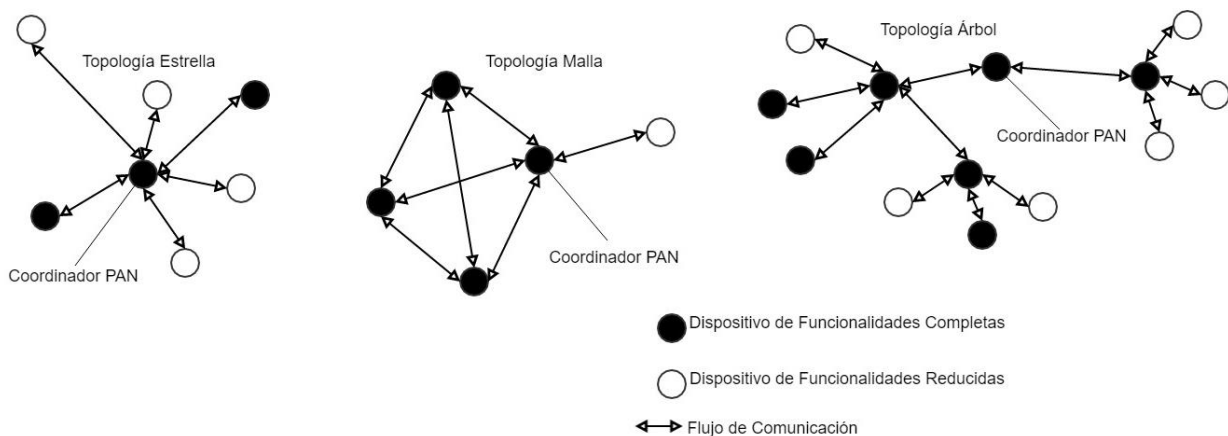
- **Coordinador PAN:** Tiene la tarea de crear la red e identificarla. Realiza la selección del canal por el cual se transmitirá la información y el identificador de la red para que los demás nodos se asocien a la misma. Además, realiza la sincronización completa de la red con cada uno de los nodos mediante la transmisión de paquetes fijo (en caso de estar habilitados).



- **Coordinador:** Habilita la interconexión de dispositivos que se encuentran fuera de la topología de red y que se encuentran dentro de su área de alcance. Sólo puede existir un coordinador PAN en cada red.
- **Dispositivo final:** No cuenta con las funcionalidades de coordinador y solo puede tener comunicación directa con un coordinador o con el coordinador PAN.

Por otra parte, un RFD tiene capacidad y funcionalidad limitada con el objetivo de obtener un bajo costo y simplicidad, por lo tanto, solo puede operar bajo el modo de dispositivo final utilizando baja capacidad de memoria y recursos mínimos. Por lo que un RFD puede comunicarse con un FFD, mientras que un FFD puede comunicarse con los RFD y otros FFD.

Dentro del estándar se definen dos topologías de red: topología estrella y topología punto-a-punto (que puede ser extendida para desplegar redes tipo malla y árbol). En la topología estrella la comunicación es establecida entre los dispositivos finales y el coordinador PAN como nodo central mientras que en la topología punto-a-punto cualquier dispositivo final puede comunicarse con cualquier otro dispositivo que se encuentren dentro del alcance (un salto). Este modo de operación permite la implementación de redes de mayor complejidad, como las redes de topología malla y árbol, tal como se muestra en la Figura 7.



**Figura 7.** Ejemplos de topología de red para IEEE 802.15.4.

### 3.3.2. Capa física

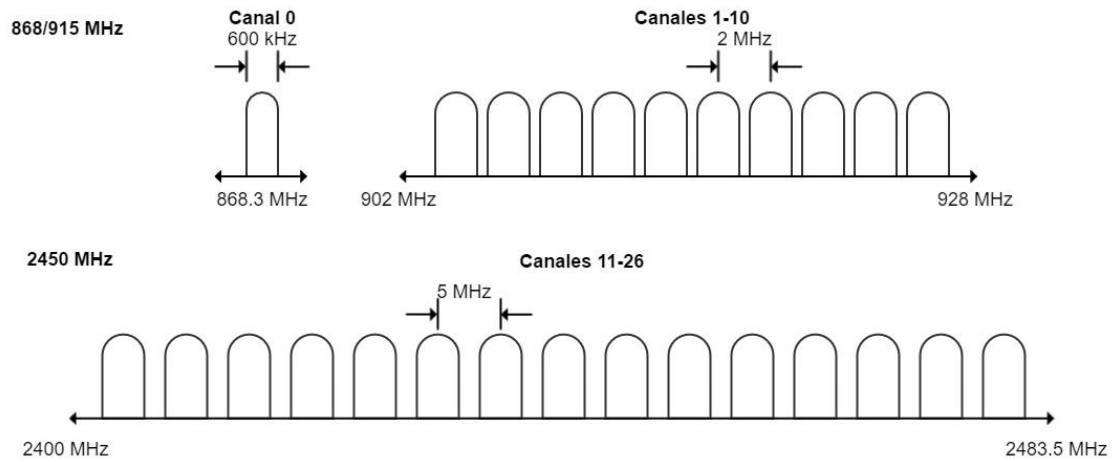
La capa física actúa como interfaz con el medio físico de transmisión, radio en este caso, e intercambia bits de datos con el medio y con la capa superior, la subcapa MAC. Las funciones de la capa física con el canal de transmisión son las siguientes:

- Activación y desactivación del transceptor.
- Selección de frecuencia del canal.
- Transmisión y recepción de datos.
- Detección de energía (ED, "*Energy Detection*") dentro del canal actual.
- Evaluación del canal libre (CCA, "*Clear Channel Assessment*") para acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones (CSMA/CA, "*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*").
- Comunicaciones a nivel de bit (modulación y demodulación de bits y sincronización de paquetes).

A nivel de capa física el radio puede operar en bandas de frecuencia sin licencia las cuales no son iguales para todos territorios en el mundo. Sin embargo, IEEE 802.15.4 emplea tres posibles bandas, en donde al menos una debería estar disponible en un territorio determinado. Las tres bandas se encuentran centradas en las siguientes frecuencias: 868, 915 y 2400 MHz.

Las bandas de 868 MHz y 915 MHz disponen de los esquemas de modulación BPSK, O-QPSK y ASK. La capa física hace uso de DSSS, cuya sencilla implementación reduce los costos de fabricación. Además, DSSS permite operar dentro de la banda ISM a 2.4 GHz. Mientras que las bandas 868/915 brindan una alternativa en caso de congestión o interferencia.

Para cada una de estas bandas se definen características de operación como son el ancho de banda, número de canales, tasa de bits, modulación, parámetros de ensanchado, entre otros. Por ejemplo, en la banda de 915 MHz se define un total de 10 canales, cada uno con un ancho de banda de 2 MHz a una tasa de 40 kbps (Figura 8).



**Figura 8.** Bandas de frecuencia de operación de IEEE 802.15.4.

Algunas de las características principales de cada una de estas bandas de radiofrecuencia se muestran en la Tabla 1. También se muestra el área geográfica en la que pueden ser utilizadas.

**Tabla 1.** Bandas de frecuencia para IEEE 802.15.4.

Banda de frecuencia (MHz)	Rango de frecuencia (MHz)	Número de canales	Esquemas de modulación	Tasa de bits (kbps)	Área geográfica
868	868 – 868.6	0 (1 canal)	BPSK, O-QPSK, ASK	20, 100, 250	Europa
915	902 – 928	1-10 (10 canales)	BPSK, O-QPSK, ASK	40, 250, 250	América, Australia
2400	2405 – 2480	11-26 (16 canales)	O-QPSK	250	Nivel mundial

### 3.4. Telefonía móvil - GSM

El sistema global para las comunicaciones móviles (GSM, “Global System for Mobile Communications”) es un estándar creado por la Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones (CEPT, siglas de su nombre en francés “Conférence européenne des administrations des postes et des télécommunications”), fue adoptado y desarrollado por ETSI (“European Telecommunications Standards Institute”) como estándar para la telefonía móvil europea.

Se trata de un estándar abierto y evolutivo. A diferencia a sus antecesores, el sistema GSM es el primer sistema de telefonía móvil en que tanto los canales de voz como los de señalización son digitales. Se diseñó con el fin de poder aplicar mayor facilidad de sistemas y técnicas de seguridad.

#### Características

- Trabaja en una amplia gama de bandas de espectro con frecuencias de 850, 900, 1800 y 1900 MHz,
- Permite que varios usuarios compartan un mismo canal al hacer llamadas simultáneamente sin interferir con las demás.
- Permite el servicio de mensajería texto (SMS).
- Capacidad de servicio internacional roaming o itinerancia.

### **3.5. Redes inalámbricas de sensores para un sistema de localización y detección de caídas de pacientes**

En este capítulo se presentaron las capacidades de las tecnologías utilizadas en sistemas de localización y detección de caídas. Debido a la topología estrella utilizada en IEEE 802.15.4 y con la capacidad de implementar una topología tipo malla, puede ser utilizada en escenarios de cobertura amplia. Para escenarios donde se tenga movilidad del usuario, es necesario considerar un mecanismo que permita el traspaso entre coordinadores de la red para cubrir el área de cobertura requerida. Sin embargo, esto causa que exista interferencia mutua entre redes IEEE 802.15.4 y problemas de *overhead* en la red dado que es necesario implementar un protocolo de enrutamiento para conocer de manera previa el camino que llevará el paquete de información. Otro problema que puede surgir, es la interferencia con otras tecnologías que trabajen en la banda de frecuencia de 2.4 GHz como Bluetooth, Wi-Fi y ZigBee, las cuales son ampliamente utilizadas hoy en día como en teléfonos inteligentes, iluminación inteligente, computadoras, bocinas inalámbricas y todo dispositivo inalámbrico que se tiene en los hogares. Por lo mencionado anteriormente en este trabajo, se propone la utilización de la tecnología LoRa, que utiliza una topología tipo estrella, y no requiere de mecanismos de traspasos debido que cuenta con características de largo alcance, incluso en ambientes de interiores. Se puede inferir que esta arquitectura permitiría reducir el *overhead* en la red dado que se tiene la cobertura necesaria para la aplicación. Adicionalmente, LoRa promete un bajo consumo de energía, en donde se plantea la utilización de sensores con un tiempo de vida de hasta años. Uno de los inconvenientes de LoRa es la baja tasa de datos, dado que no fue diseñado para aplicaciones como telemonitoreo de variables fisiológicas como ECG, más bien para

aplicaciones de dispositivos IoT, agricultura, medidores inteligentes, etc. En donde se maneja baja tasa de datos en tiempos esporádicos.

**Tabla 2.** Comparación entre LoRa y IEEE 802.15.4.

<b>Características</b>	<b>IEEE 802.15.4</b>	<b>LoRa</b>
Frecuencia de operación	868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz	169 MHz, 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz
Modulación	BPSK, O-QPSK	LoRa
Técnica de acceso al medio	CSMA/CA	Aloha
Tasa de datos (máxima)	250 kbps (2.4 GHz)	50 kbps
Sensitividad	-85 dBm	-150 dBm
Ancho de banda por canal	5 MHz	125/500 kHz
Número de canales	16	64 (125 kHz) y 8 (500 kHz)
Topología de red	Estrella, árbol, malla	Estrella
Cobertura (máxima)	100 m.	15 km.

Otra tecnología que es utilizada en aplicaciones de telemonitoreo, rastreo y localización es la red celular, la cual ha cobrado gran relevancia dado que existe una amplia cobertura. Como se mostró en el Capítulo 1, la gran mayoría de las soluciones para este tipo de aplicaciones son realizadas mediante la integración de un teléfono inteligente. Sin embargo, no todas las personas cuentan con un teléfono móvil. Además de que las arquitecturas propuestas aún no han resuelto el problema del consumo de energía en este tipo de redes, el cual hace necesario recargar el dispositivo cada día. Esto puede llegar a ser un inconveniente que podría contribuir a que una persona deje de utilizar el sistema.



## Capítulo 4. Diseño de la cama de pruebas experimental para localización de pacientes

### 4.1. Introducción

En este capítulo se muestra la arquitectura (Figura 9) de la cama de pruebas experimental propuesta, el algoritmo de localización y la evaluación del sistema de localización. En el diseño de la cama de pruebas se considera el uso de dispositivos Bluetooth Low Energy (BLE) anunciantes como referencia para el cálculo de la posición de los NOI. Posteriormente, la información de localización es enviada a través de las tecnologías presentadas en el Capítulo 3. Además, se envía información sobre el estado de la persona, si se ha detectado una caída o no. El procesamiento del algoritmo de localización y detección de caídas se realiza en un sistema central, al igual que la configuración y comunicación con los radios transceptores de las distintas tecnologías. Para llevar a cabo una comparación justa entre las tecnologías es necesario utilizar el mismo sistema de procesamiento para en cada evaluación. Lo que difiere entre la utilización de una tecnología u otra son los comandos de configuración para su respectivo radio transceptor.

Se realizó la evaluación del desempeño del sistema propuesto en términos de:

- consumo de energía
- número de paquetes perdidos
- cobertura.

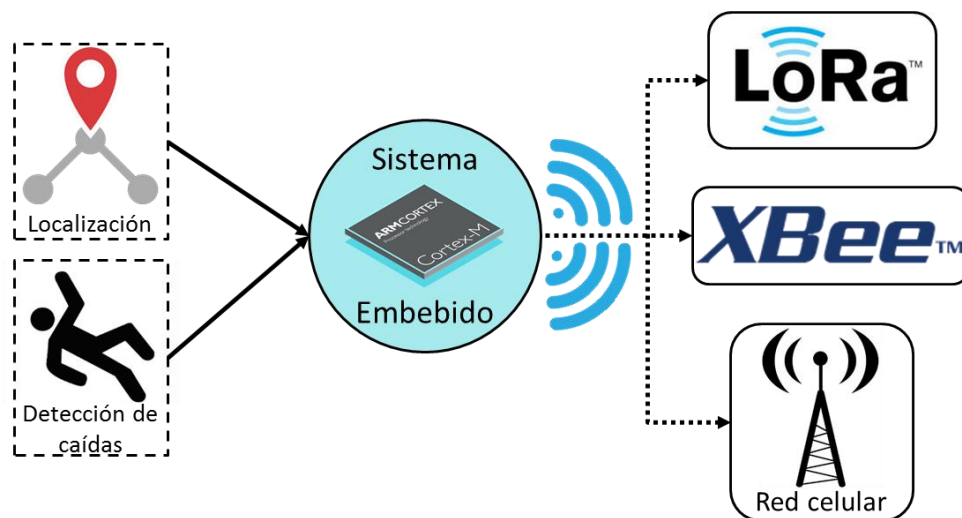


Figura 9. Diagrama a bloques del sistema.

## 4.2. Arquitectura de la cama de pruebas

El esquema general es un sistema embebido que se encuentra adquiriendo la información de localización en interiores y un sistema de alerta de caídas. Se propone utilizar la tecnología BLE para el sistema de localización en interiores. Se despliegan varios dispositivos BLE anunciantes que continuamente envían paquetes de beacon, los cuales son usados por el sistema de localización, basado en el algoritmo WCL descrito en el capítulo 2.

Las pruebas fueron realizadas en el edificio de Física Aplicada del CICESE, el cual es un edificio de 3 pisos con oficinas en la periferia y un espacio de servicio al centro. La implementación del sistema se realizó en un ambiente no controlado, es decir, con personas caminando a través de los pasillos tal como sería en un centro de cuidado de adultos mayores. Para el sistema de posicionamiento se desplegaron cuatro dispositivos BLE anunciantes que transmiten de manera periódica su posición estática. La información que transmiten los dispositivos BLE anunciantes es recibida por el sistema embebido, llamado BLE Observador, el cual realiza la estimación de su posición mediante el algoritmo WCL.

En el desarrollo de la cama de pruebas experimental para localización de pacientes fueron utilizados plataformas y transceptores de diferentes fabricantes. A continuación se describe brevemente el trabajo desarrollado en cada uno de ellos.

### 4.2.1. Selección del sistema de procesamiento

El sistema de procesamiento es esencial dado que en este se realiza todo el procesamiento del sistema de monitoreo, rastreo y localización. Debe contar con un procesador que incluya un conjunto de instrucciones con las capacidades de procesamiento e implementación del algoritmo de localización al igual que las rutinas de comunicación con los diferentes radios transceptores a evaluar. Además, es importante tomar en cuenta el procesador que utiliza el sistema de procesamiento debido a que este debe estar enfocado en aplicaciones de bajo consumo de energía y bajo costo.

Para la selección del sistema de procesamiento fue necesario tomar en consideración que dicho sistema debe contar con un procesador de bajo consumo de potencia y alto desempeño, para este caso seleccionó el procesador ARM Cortex-M0 el cual cumple con estos requerimientos, además brindando la portabilidad entre la familia de procesador Cortex-M. El microprocesador debe contar con puertos de comunicación SPI (*“Serial Peripheral Interface”*) y UART dado que los transceptores que se utilizan hacen uso de estos



puertos de comunicación para el intercambio de mensajes de control. Asimismo, es necesario que el sistema de procesamiento cuente con la compatibilidad de pines del estándar Arduino Uno Rev. 3, dado que las placas de expansión, que es donde se montan los diferentes transceptores, utilizan dicho estándar.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, se decidió utilizar como el sistema de procesamiento central la tarjeta de evaluación Nordic nRF51-DK del fabricante Nordic Semiconductor. En esta tarjeta se desarrollaron dos programas, uno para el algoritmo de localización y otro para el envío de paquetes con los datos de localización a través de las tecnologías a evaluar. La segunda tarjeta de evaluación utilizada fue la NUCLEO-L152RE del fabricante ST Microelectronics, esta se usó como nodo resumidero para cada uno de los transceptores utilizados y se habilitó la comunicación vía puerto serial (UART). En la Tabla 3 se muestra un resumen de las características que presentan ambas tarjetas de evaluación.

**Tabla 3.** Comparación entre los sistemas de procesamiento utilizados.

<b>Características</b>	<b>NUCLEO-L152RE</b>	<b>Nordic nRF51-DK</b>
Procesador	ARM® Cortex®-M3 de 32 bits	ARM® Cortex®-M0 de 32 bits
Tipo de alimentación	USB Externa 3.3V, 5V, 7-12 V	USB Externa 1.8V - 3.6V Batería tipo botón (3.3 V)
Número de GPIO	51	32
Interfaces de comunicación	I2C UART SPI	I2C UART SPI
Memoria Ram	80 kB	16 kB
Memoria Flash	515 kB	128 kB
Compatibilidad con ARM mbed	Si	Si
Compatibilidad con estándar Arduino Uno R3	Si	Si
Extra	Almacenamiento masivo (USB)	Transceptor de Bluetooth v4.1

#### **4.2.2. Selección del módulo LoRa**

Para la selección del módulo transceptor LoRa fue necesario tomar en consideración qué tanto permite el dispositivo el manipular la pila del protocolo LoRa, debido a que algunos dispositivos no permiten que el usuario tenga control total de la configuración del radio. Además, otra consideración importante fue que

el radio trabajara dentro de la banda de frecuencia ISM (“*Industrial, Scientific and Medical*”) de 915 MHz debido a que esta banda de frecuencia puede ser utilizada sin necesidad de licencia. Tomando esto en cuenta, a continuación se muestran algunos dispositivos que fueron considerados a la hora de adquirir el módulo transceptor LoRa.

#### **Symphony Link Low Power LoRa**

Es un transceptor optimizado para ser utilizado en la banda ISM de 915 MHz. Utiliza la modulación de LoRa para maximizar el rango de transmisión mientras minimiza la interferencia y el consumo de energía. El módulo utiliza el microprocesador Renesas y tiene menor consumo de corriente de los módulos LoRa encontrados, por lo tanto, entrega la mayor duración de la vida de las baterías.

**Limitaciones:** No permite la comunicación con otros módulos transceptores LoRa de otras marcas, dado a que solo fue diseñado para comunicarse con dispositivos de la misma compañía.

#### **Microchip RN2483 LoRa Mote**

Es un transceptor que provee una plataforma para la demostración de las capacidades de larga distancia. Incluye sensores de luz y temperatura para generación de información que posteriormente será enviada a un resumidero. Cuenta con una pantalla que despliega los estados de conexión, valores de los sensores y acuses de recibo e información recibida. El módulo utiliza un microcontrolador Microchip de la familia PIC18F25K50.

**Limitaciones:** Solo permite la transmisión de información de los sensores de luz y temperatura por lo que limita mucho la utilización de este dispositivo.

#### **Semtech SX1276MBLAS**

Es un dispositivo transceptor LoRa que permite la utilización de la modulación LoRa. Puede comunicarse vía interfaz SPI. Está diseñado para trabajar en dos frecuencias de operación: 433 MHz y 915 MHz.

**Limitaciones:** Solo se puede comunicar vía interfaz SPI.

#### **4.2.2.1. Discusión módulos LoRa**

En la Tabla 4 se muestran las características principales que fueron tomadas en cuenta a la hora de la selección del módulo LoRa. Como se mencionó en la sección 4.2.2, es importante tomar en cuenta que la banda de frecuencia de operación sea de 915 MHz, por lo que se descartó el módulo Microchip RN2483 LoRa Mote, aunque la compañía Microchip informó que en un futuro lanzarán al mercado módulos que

trabajen en la banda de frecuencia de 915 MHz. Los módulos Symphony Link Low Power LoRa y Semtech SX1276MBLAS cuentan con características muy similares, con la ventaja el módulo Symphony ya cuenta con un microcontrolador integrado por lo que no requiere de un sistema de procesamiento extra, pero cuenta con la desventaja de ser una plataforma cerrada dado que no permite trabajar con la capa de acceso al medio de LoRa, sólo son el protocolo Symphony Link. Esto también es una desventaja importante en el contexto del trabajo, dado que el microprocesador que incluye el módulo Symphony no puede ser utilizado para las otras dos tecnologías, por lo que la comparación no sería llevada a cabo en las mismas condiciones. Por lo tanto, se eligió el dispositivo Semtech SX1276MBLAS dado que permite la configuración directa con el radio por lo que provee una gran ventaja a la hora de configurar el dispositivo dado los requerimientos de la red. Para su programación se utiliza una tarjeta de evaluación con las rutinas que permiten la configuración y control del transceptor LoRa.

**Tabla 4.** Comparación de modulos LoRa.

<b>Características</b>	<b>Symphony Link Low Power LoRa</b>	<b>Semtech SX1276MBLAS</b>	<b>Microchip RN2483 LoRa Mote</b>
Frecuencias de operación	915 MHz	433 MHz y 915 MHz	433 MHz y 868 MHz
Tasa de datos máxima	37.5 kbps	37.5 kbps	5.469 kbps
Potencia de transmisión máxima	18 dBm	20 dBm	14 dBm
Corriente pico de transmisión	122 mA	120 mA	38.9 mA
Corriente pico de recepción	10 mA	9.9 mA	14.2 mA
Sentividad del receptor	-137 dBm	-148 dBm	-148 dBm
Microcontrolador	Renesas (R5F51116ADNE)	X	PIC18F45K50
Conexiones de datos	USB, I2C, SPI, UART	SPI	UART
Precio (dólar)	87.49	63.75	69.99
Frecuencia de reloj	32 MHz	32 MHz	32 MHz
Sensores integrados	X	X	Temperatura y de luz ambiental

### 4.2.3. Selección del módulo IEEE 802.15.4

Para la selección del módulo transceptor IEEE 802.15.4 se tomó en cuenta la experiencia previa con el dispositivo XBee Serie 1. Con este módulo se busca la configuración de la capa física y capa de acceso al medio de manera personalizada, es decir, que el fabricante no limite la funcionalidad del estándar en sus dispositivos.

#### **XBee Serie 1**

Es un dispositivo IEEE 802.15.4 que puede comunicarse vía interfaz serial con otro dispositivo e intercambiar mensajes de control mediante comandos AT para realizar diversas acciones de la pila de protocolos de IEEE 802.15.4. Permite crear redes punto a multipunto y punto a punto. Para su programación se utiliza en conjunto con la placa base Seed Studio -XBee Shield V2.

**Trabajo desarrollado:** Se realizaron rutinas para habilitar la configuración del dispositivo por medio de comandos AT.

### 4.2.4. Selección del módulo GSM

Para la selección del módulo GSM se tomaron en cuenta dos dispositivos: Nimberlink Skywire Celular Modem y Módulo GSM SIM800L. A continuación se describen ambos brevemente:

#### **Nimberlink Skywire Celular Modem**

Es un dispositivo LTE 4G que puede comunicarse vía interfaz serial. Además, cuenta con sensores de aceleración, temperatura, humedad, y presión. Cuenta con la capacidad de añadir dispositivos GPS, pantalla LCD, controladores de motor, etc.

**Limitaciones:** Requiere de alimentación externa de 12 volts, por lo que hace que el sistema no sea viable para pruebas de movilidad y cobertura, por estas limitaciones se decidió no trabajar con este módulo.

#### **Módulo GSM SIM800L**

Es un módulo GSM/GPRS Quad-band que trabaja con frecuencias de 850/900/1800/1900 MHz. Este módulo de telefonía móvil permite hacer y recibir llamadas de voz, enviar y recibir mensajes SMS y enviar y recibir datos (TCP/IP, UDP, HTTP, etc.). Puede comunicarse vía interfaz serial y ser configurado vía comandos AT. La ventaja que tiene este módulo en comparación con Nimberlink es que trabaja con un voltaje de operación de 3.4 V ~ 4.4V DC por lo que fue posible utilizar una tarjeta de evaluación como fuente de alimentación. Otra ventaja es el consumo de corriente pico de transmisión, para el módulo GSM

es de aproximadamente 500 mA. mientras que en el módulo Nimberlink puede alcanzar una corriente pico de hasta 2 Amperes. Dadas estas dos ventajas fue que se eligió trabajar con el módulo GSM SIM800L.

**Trabajo desarrollado:** Se habilitó la comunicación vía puerto serial (UART) para intercambiar comandos AT a través del sistema de procesamiento. Se desarrollaron dos rutinas una para la transmisión de mensajes SMS y otro para la transmisión de datos GPRS (UDP). La rutina para la transmisión de mensajes SMS realiza la configuración del módulo GSM con los comandos necesarios para habilitar la función de enviar y recibir mensajes SMS. La rutina para la transmisión de datos GPRS (UDP) realiza la configuración del módulo GSM con los comandos necesarios para realizar el envío de datos GPRS (UDP) en donde se abre un socket UDP y se realiza la transmisión de la información de localización.

### **4.3. Implementación del algoritmo de localización**

Los dispositivos faro BLE tienen como objetivo el enviar pequeños paquetes de información a todo los nodos que se encuentren dentro de su rango de cobertura. El dispositivo receptor adopta el ciclo de escaneo que empieza a escuchar el canal radio, esperando la recepción de paquetes tipo faro. Este dispositivo escanea de manera indefinida el medio, y cada paquete faro es reportado como recibido, por lo que es necesario tomar en cuenta una ventana de observación para evaluar la información que se ha recibida. En cada paquete que se recibe se obtiene el RSSI de dicho paquete, el cual se va actualizando conforme se van recibiendo más paquetes del mismo destino. Por lo que es importante tomar varias muestras del mismo nodo destino para determinar si el RSSI permanece relativamente constante, de ser así obtener la información de localización de dicho nodo.

#### **4.3.1. Descripción de la tecnología utilizada**

Bluetooth Low Energy (BLE) es un conjunto de protocolos del estándar de telecomunicaciones Bluetooth, es la última mejora que se ha realizado a la tecnología Bluetooth, a la par con la especificación de Bluetooth 4.0. Como su nombre lo describe, tiene el objetivo de ser utilizado en dispositivos de muy bajo consumo, baja tasa de datos y de corto alcance (hasta 50 metros). Dispositivos con esta tecnología cuentan con una expectativa de vida desde meses hasta incluso años con una batería de tipo botón o con baterías similares, sin la necesidad de recargarse o ser reemplazadas. Esto es de gran ayuda en aplicaciones en donde se dificulta el recargar baterías de manera frecuente. El envío de información es generalmente en pequeñas ráfagas que no necesitan ser enviadas frecuentemente.

Un dato importante a mencionar es que el bajo consumo de potencia se debe al diseño de BLE que permite ciclos de trabajo pequeños y tamaños de paquetes menores a los que se tienen con la tecnología de

Bluetooth. De hecho, la circuitería utilizada en los radios de BLE es la misma que es utilizada en Bluetooth y ambos operan en la banda de frecuencia de 2.4 GHz bajo el esquema de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, “*Time Division Multiple Access*”).

Bluetooth Low Energy puede ser utilizado en una amplia variedad de aplicaciones como:

- Internet de las Cosas
- Dispositivos de cuidado de la salud, como termómetros, medidores de presión y glucómetros.
- Automatización del hogar.
- Entretenimiento del hogar, como controles remotos, teclados inalámbricos, etc.

#### 4.3.1.1. Arquitectura

La arquitectura del estándar Bluetooth Low Energy define cuatro diferentes tipos para los dispositivos:

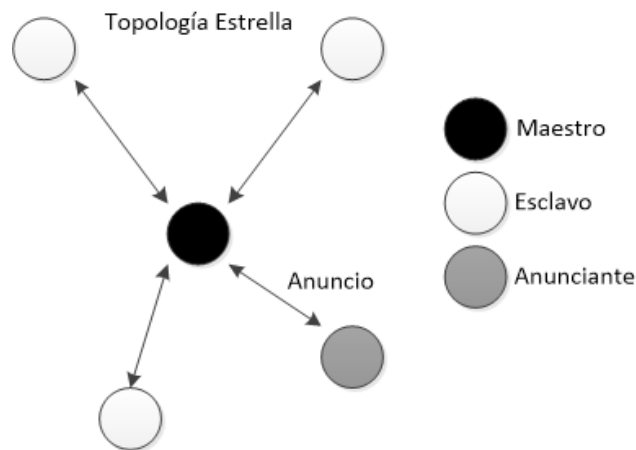
- **Maestro (Master):** Dispositivo central que realiza un escaneo constante en una frecuencia definida para la búsqueda de paquetes anunciantes de dispositivos que desean unirse a la red. Una vez que la conexión ha sido establecida, el maestro se encarga de administrar y sincronizar todos los dispositivos para la correcta implementación de la técnica de acceso al medio TDMA.
- **Esclavo (Slave):** Es un dispositivo que envía paquetes anunciantes en donde busca unirse y sincronizarse a la red creada por un maestro. Una vez que se encuentra en una conexión activa, el esclavo recibe y envía datos desde y hacia el maestro, no obstante no puede comunicarse directamente con otros dispositivos esclavo en la red.
- **Anunciante (Advertiser):** Es un dispositivo que envía paquetes de anuncio de manera periódica en diferentes canales con el fin de establecer una conexión.
- **Escáner (Scanner):** Es el dispositivo que busca en los diferentes canales a otros dispositivos que se encuentren anunciándose para establecer una conexión.

Cuando un dispositivo se encuentra en su estado de anuncio y recibe una petición de conexión, este se convierte de manera automática en esclavo mientras que el dispositivo que decide iniciar la conexión se convierte en maestro. En la Figura 10 se muestra un diagrama de estado de los diferentes tipos de dispositivos y sus diferentes estados. Cabe mencionar que todos los dispositivos Bluetooth Low Energy deben de tener la capacidad de asumir cualquier rol según sea el caso.



**Figura 10.** Diagrama de estados de los dispositivos Bluetooth Low Energy.

La única topología de red soportada por BLE es la topología tipo estrella, en que todos los esclavos envían de manera directa datos hacia el maestro (Figura 11).



**Figura 11.** Topología estrella para redes de Bluetooth Low Energy.

### 4.3.2. Implementación del algoritmo de localización

Existen diferentes técnicas con las cuales se puede estimar la posición relativa con respecto a puntos con su posición previamente conocida. Dado un modelo de propagación de señales, la fuerza de la señal recibida (RSS, "Received Signal Strength") de un transmisor puede ser utilizada para estimar la distancia desde un transmisor a un receptor, o estimar la posición de un nodo en un área en lo específico. Sin

embargo, este modelo es susceptible a variaciones debido al ambiente mismo de la aplicación y tampoco toma en cuenta las variaciones de sensibilidad del receptor ni con la orientación de la antena, entre otros factores (Benkic et al, 2008). Para ambientes de exteriores, el modelo de propagación suele ser más preciso, en cambio, para ambientes de interiores el modelo de propagación tiene más imprecisiones debido a obstáculos como paredes, objetos de oficinas, etc. (Benkic et al., 2008)

El modelo de Log-Normal es un modelo de propagación general que proporciona parámetros, los cuales pueden ser configurados dado el entorno (interior o exterior) como se muestra en la ecuación 5 (Benkic et al., 2008; Willis, 2014).

$$P_{dB} = P(d_0) - 10 \times n \times \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (5)$$

Donde:

$P(d_0)$  es la pérdida por trayectoria a una distancia de referencia  $d_0$ .

$n$  es el índice de pérdidas por trayectoria.

$d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor.

Para conocer la distancia que existe entre el transmisor y el receptor, a partir del RSSI recibido, es calculada  $d$  despejando de la ecuación 1, dando como resultado la expresión mostrada en la ecuación 6:

$$d = d_0 \left( 10^{\left( \frac{P(d_0) - P_{dB}}{10 \times n} \right)} \right) \quad (6)$$

Para la obtención de manera analítica  $P(d_0)$  se tomó en cuenta que la banda de frecuencia de BLE es de 2.4 GHz. La longitud de onda es igual a la velocidad de la luz en el vacío dividido por la frecuencia.

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad (7)$$

Donde:

$\lambda$  es lambda.

$c_0$  es la velocidad de la luz en el vacío.

$f$  es la frecuencia.

El valor de  $\lambda$  para la frecuencia de operación de 2.4 GHz da como resultado 0.125 metros. Por lo que  $d_0$  tiene el valor de 0.125 m. Cabe mencionar que si se desea implementar la misma técnica de localización a diferente banda de frecuencia será necesario realizar de nuevo el cálculo del valor de  $\lambda$  para así obtener un valor  $d_0$  de acorde a la nueva frecuencia de operación.



Una vez obtenido el valor de  $d_0$ , es necesario obtener  $P(d_0)$ , para lo cual se realizó la implementación física del dispositivo tipo anunciante en donde se utilizó un SensorTag CC2640STK y una Nordic nRF51-DK para la implementación del dispositivo tipo observador. Se manejan dos códigos, el primer código maneja al transceptor SimpleLink multi-estándar CC2650 SensorTag (CC2640STK) de Texas Instruments como modo anunciante, y el segundo código maneja la tarjeta de evaluación Bluetooth Low Energy nRF51822 de Nordic Semiconductor.

Al ejecutar el primer código se empieza el modo de operación de generador de paquetes faro sin conexión: En este modo de operación se genera paquetes que envían información que se encuentra guardada en la memoria interna del dispositivo. En este modo, el dispositivo no cuenta con capacidades de recepción de ningún tipo de paquete por lo que logra un bajo consumo de potencia. Se configuró de tal manera que los paquetes faro son enviados a una frecuencia de 50 Hz. Se utiliza el siguiente pseudocódigo para general los paquetes tipos Faro:

**Programa:** Generación de paquetes tipo Faro

Variables: coordenadas del dispositivo Anunciante actual, intervalo entre cada paquete tipo Faro

Algoritmo:

Mientras (Verdadero)

    Despertar al dispositivo.

    Transmitir paquete tipo Faro con las coordenadas del dispositivo.

    Poner el dispositivo en modo dormido por el intervalo establecido.

FinMientras

FinPrograma

El segundo código ejecuta el modo de operación de captura de paquetes, en donde se reciben todos los paquetes faro que se encuentren en su área de cobertura y lleva un registro con la finalidad de almacenar información sobre los paquetes recibidos. A partir de este registro es posible obtener estadísticas de calidad del enlace. Para la captura de paquetes tipo Faro se utiliza el siguiente pseudocódigo:

**Programa:** Captura de paquetes tipo Faro

Variables: Número máximo de muestras (nMax), Arreglo de direcciones de dispositivos anunciantes [2],

Variable de iteración ( $i$ ),

Algoritmo:

Mientras (  $i \leq nMax$  )

Si ( direcciónRecibida = direccionBaseDatos\_Anunciantes)

Almacenar valor de RSSI de dicha dirección y enviar a través del puerto  
UART

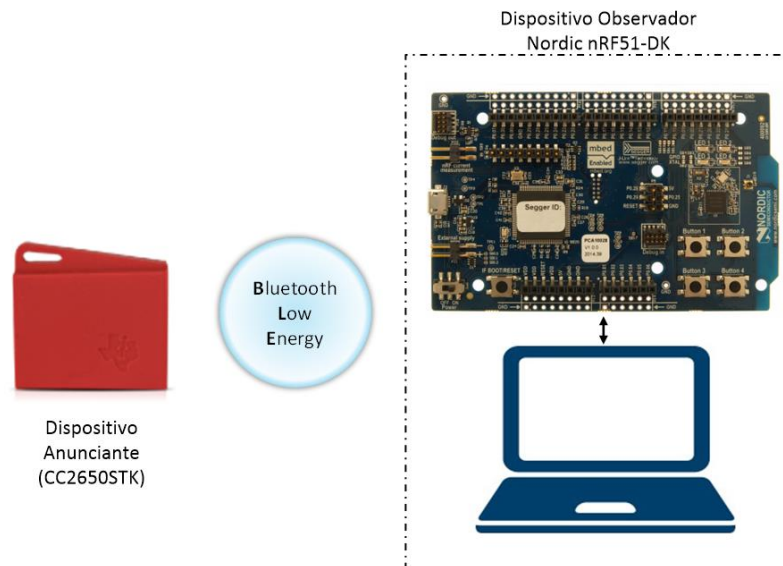
Si-no

Descartar paquete recibido

FinMientras

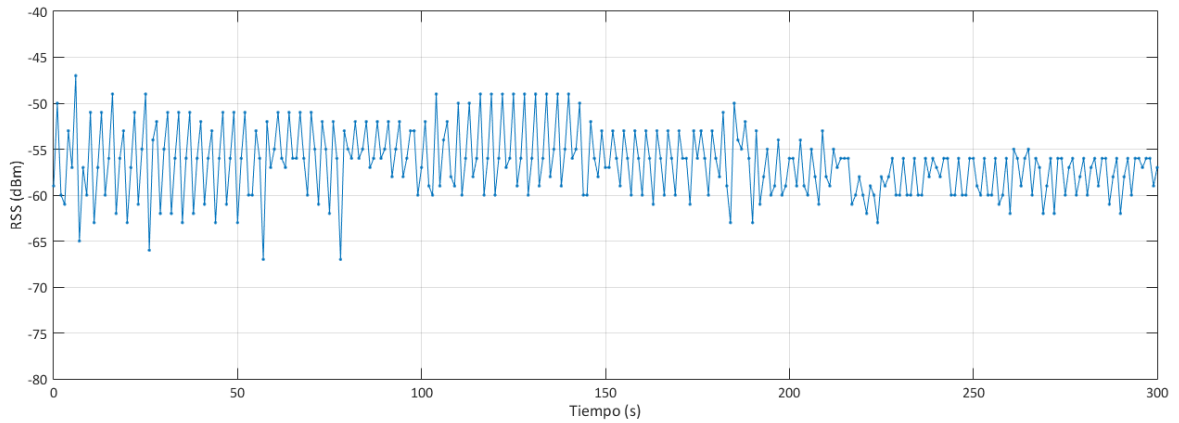
FinPrograma

En la Figura 12 se muestra el esquema experimental del dispositivo tipo observador con el equipo utilizado para su formación.



**Figura 12.** Esquema experimental del dispositivo tipo observador.

El dispositivo anunciante se encuentra enviando paquetes tipo faro a 50 Hz (cada 20 milisegundos). El dispositivo observador está configurado de tal manera que realiza un ciclo de escaneo del canal radio cada 200 microsegundos. Ambos dispositivos se encuentran a una distancia  $d_0$  de 12.5 centímetros. El experimento se realizó por un tiempo de 5 minutos. En la Figura 13 se observan las muestras de RSS que adquirieron en este experimento. De las muestras obtenidas se obtuvo un valor promedio de  $-56.57 \pm 3.65$  dBm. Este valor es muy importante para la implementación del algoritmo de localización dado que es el valor de la potencia de referencia  $P(d_0)$ .



**Figura 13.** Variación de RSS con respecto al tiempo.

Con esta información ya es posible estimar la distancia entre el transmisor y el receptor, por lo que es posible realizar la simulación del algoritmo de localización para comprobar que el algoritmo funcione de la manera correcta. Para ello se realizó un segundo experimento, similar al interior solo que ahora se agregó otro dispositivo anunciante.

Se realizó el despliegue de dos dispositivos BLE Anunciantes a los extremos de un pasillo del edificio de Física Aplicada del CICESE. Se tomaron muestras por 3 minutos en cada uno de los 5 puntos equidistantes, tal como se muestra en la Figura 14. El dispositivo BLE Observador se situó en cada uno de los puntos.



**Figura 14.** Escenario de medición de RSSI.

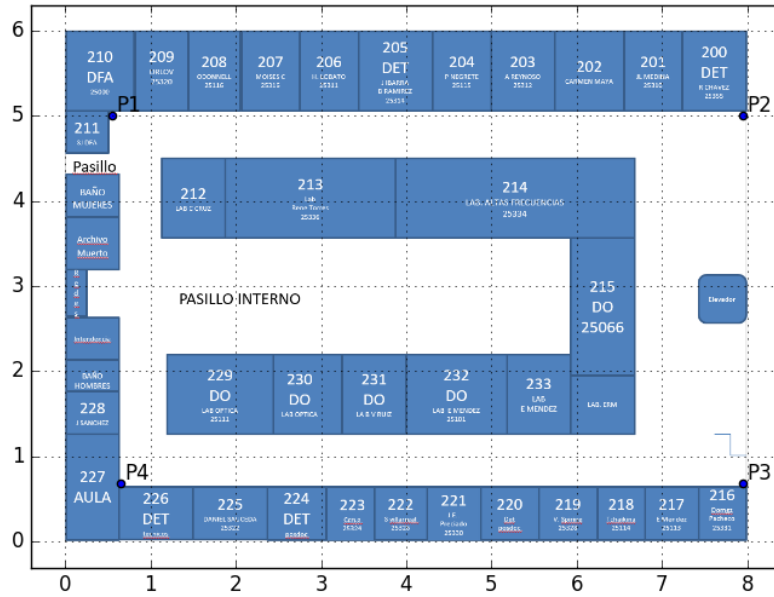
Este experimento se realizó tres veces a diferentes horario y día para observar que tanto se ven afectadas las mediciones de RSS conforme objetos móviles (personas) se desplazan alrededor del pasillo. En la Tabla 5 se muestran los resultados de las mediciones de RSSI.

**Tabla 5.** Mediciones de RSSI en cinco puntos

		Punto A		Punto B		Punto C		Punto D		Punto E	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Promedio	Primer medición	-80.596	-104.063	-93.404	-104.857	-98.722	-104.368	-103.200	-89.248	-103.122	-85.892
	Segunda medición	-82.09	-94.62	-81.77	-81.70	-92.32	-93.67	-101.93	-92.69	-100.5	-73.31
	Tercer medición	-77.730	-103.88	-79.52	-94.75	-92.74	-97.85	-97	-92.74	-103.63	-87.33

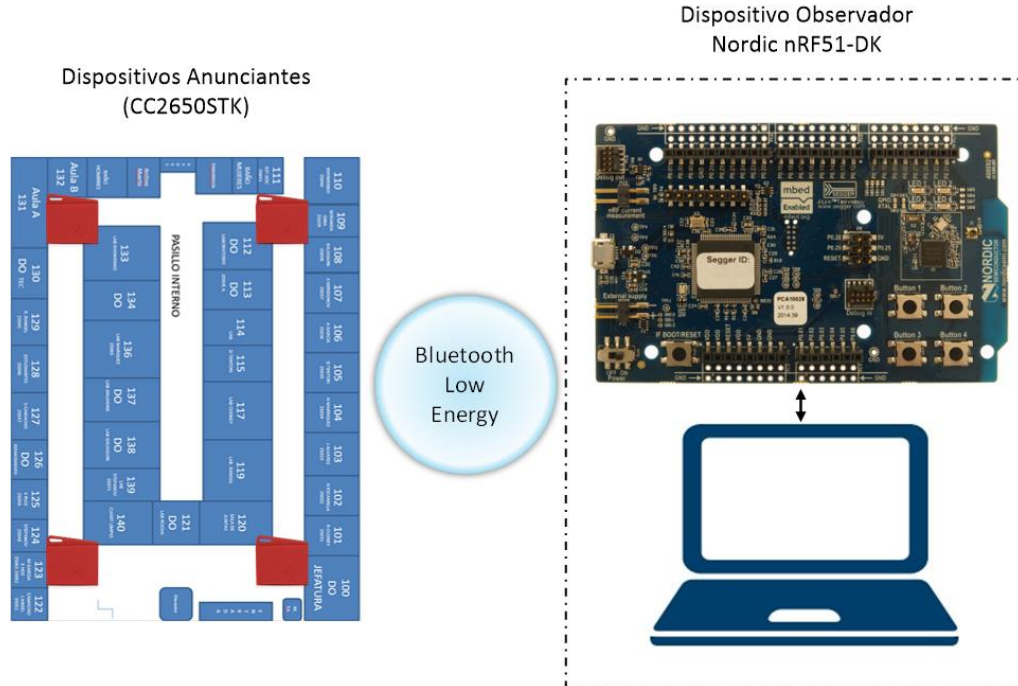
Se puede observar en la Tabla 5 que para las tres mediciones en diferentes puntos no representa gran diferencia debido a que las mediciones de RSSI no se ven considerablemente afectadas por personas que se encuentran desplazándose a través del pasillo. También se observa que conforme el dispositivo tipo Observador se encuentra más cerca de un punto se obtiene una mejor calidad del enlace, entre más cerca se encuentre se tendrá más estabilidad del enlace por lo que se tendrá menor tasa de paquetes perdidos.

La implementación del algoritmo de localización se realizó en la tarjeta de evaluación Nordic nRF51-DK. Las consideraciones que se tomaron en cuenta para la implementación del algoritmo fueron las siguientes: cuatro dispositivos BLE anunciantes situados en las esquinas de la segunda planta del edificio de Física Aplicada, cada uno en una de las cuatro esquinas correspondientes. Se asignaron coordenadas a cada uno de los cuatro dispositivos BLE anunciantes, en donde cada coordenada corresponde a cada una de las esquinas de la segunda planta del edificio. Se basó en el plano del edificio que fue proporcionado por personal del departamento de Física Aplicada. Para observar las coordenadas de la persona dentro del edificio de una manera visual se desarrolló una interfaz gráfica utilizando el lenguaje de programación Python. La interfaz gráfica se ejecuta en la computadora que se encuentra conectada al nodo resumidero haciendo uso de puerto de comunicación UART. En la Figura 15 se muestra la interfaz gráfica, la cual grafica las coordenadas de localización de la persona de manera continua. Para cada plano representativo de cada planta del edificio de Física Aplicada se realizó el cuadrículado para representar las coordenadas de la persona.



**Figura 15.** Interfaz gráfica desarrollada con la utilización de los planos representativos del edificio de Física Aplicada que fueron proporcionados por el personal administrativo de CICESE.

En la Figura 16 se muestra el esquema de evaluación del algoritmo de localización.



**Figura 16.** Esquema de evaluación del algoritmo de localización.

En la Figura 17 se muestran 5 posiciones estáticas que se asignaron alrededor de la segunda planta del edificio. Se tomaron muestras por 2 minutos. Se realizó el desarrollo de una interfaz gráfica en la cual se graficaron las coordenadas que fueron asignadas por el algoritmo de localización.



**Figura 17.** Implementación del algoritmo de localización en la segunda planta del edificio de Física Aplicada.

Se puede observar que las coordenadas asignadas por el algoritmo de localización no son exactas con respecto a la posición del dispositivo Observador, esto es dado a la inestabilidad que se observó en la Tabla 5 con respecto a los valores de RSSI. Se está realizando la estimación de la localización de manera aproximada, aunque brinda la información suficiente para conocer a grosso modo la posición del dispositivo Observador. Es importante recordar que la precisión de ésta técnica viene dada por el algoritmo usado para estimar la localización, el número de dispositivos anunciantes BLE y el modelo de pérdidas por propagación seleccionado. Por otra parte, en este mismo entorno, debido a la obstrucción de techos, paredes, escritorios u otros objetos, el camino de propagación de línea de vista directa no es siempre el que ofrece un valor de RSSI en algunos casos sin línea de vista. De esta manera, el error depende de los objetos que se encuentran en interiores causando degradación de la señal diferente al modelo de pérdidas por propagación. Sin embargo, para efectos de la prueba de concepto que se propone en este trabajo para evaluar el desempeño de LoRA, se considera suficiente la información de localización obtenida con el algoritmo.

## Capítulo 5. Implementación de la cama de pruebas experimental

---

### 5.1. Introducción

En los capítulos anteriores se discutieron las características de LoRa y de las tecnologías de redes inalámbricas que serán utilizada como referencia para la evaluación del desempeño de LoRa, así como el diseño de la cama de pruebas experimental donde se implementó el algoritmo de localización y los diferentes radios. En este capítulo se detalla la metodología seguida para la implementación de la cama de pruebas experimental diseñada. De manera adicional, se presentan los escenarios de pruebas sobre los que se evaluó la cama de pruebas implementada tomando en cuenta las consideraciones presentadas en los capítulos anteriores.

### 5.2. Implementación experimental de la cama de pruebas

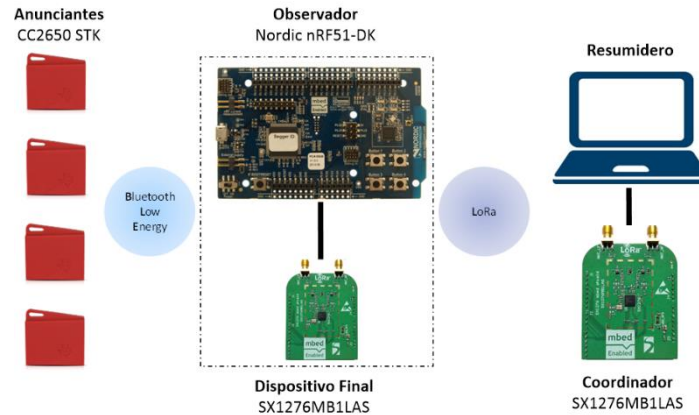
La implementación básica del observador BLE se realizó en una tarjeta Nordic nRF51-DK. El módulo implementado en la tarjeta Nordic nRF51-DK maneja a los transceptores LoRa (SX1276MBLAS) de Semtech, IEEE 802.15.4 (XBee Series 1) de Digi International y el módulo GSM (SIM800L) de SIMCom. Por lo que el código para la inicialización e implementación del algoritmo de localización es el mismo.

Por otro lado, la comunicación entre los transceptores inalámbricos IEEE 802.15.4 y GSM, y la plataforma Nordic nRF51-DK se realiza utilizando los puertos UART. Mientras que para el transceptor LoRa la comunicación con el observador se realiza utilizando el puerto SPI. Por lo que el módulo de software utilizado para la comunicación con cada una de los transceptores es diferente dado que cada uno utiliza diferentes comandos para la comunicación y control.

Para la implementación física de los dispositivos tipo anunciantes BLE se utilizaron cuatro SensorTag de Texas Instruments (CC2650 STK). El código implementado en la tarjeta en los SensorTag realiza la configuración del rol de los dispositivos como anunciantes. De esta manera, los SensorTag sólo envían la información de sus coordenadas de forma periódica y no establecen conexión con otro dispositivo. Se establecen cuatro modos de operación para el dispositivo tipo Observador BLE:

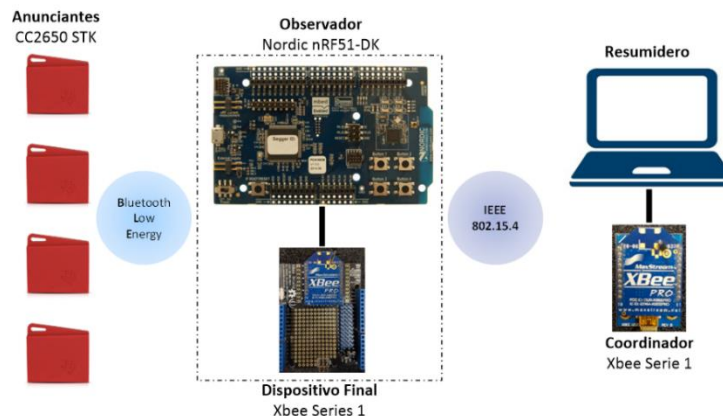
- **Observador BLE – LoRa:** Provee la funcionalidad de procesamiento del algoritmo de localización con el fin de estimar la localización del dispositivo en interiores dentro del escenario de evaluación.

Se realiza la configuración del transceptor LoRa con el fin de enviar la información de localización, y también se realiza la configuración del transceptor BLE para configurar el dispositivo como tipo observador. Adicionalmente, se reciben los paquetes LoRa de los diferentes dispositivos tipo anunciantes BLE y una vez que los datos recibidos son los suficientes para realizar la estimación de la localización, se envía la posición estimada por el algoritmo WCL a través del enlace LoRa establecido. En la Figura 18 se muestra el esquema de la implementación experimental utilizada con los transceptores LoRa.



**Figura 18.** Esquema experimental del dispositivo tipo observador BLE con transceptor LoRa.

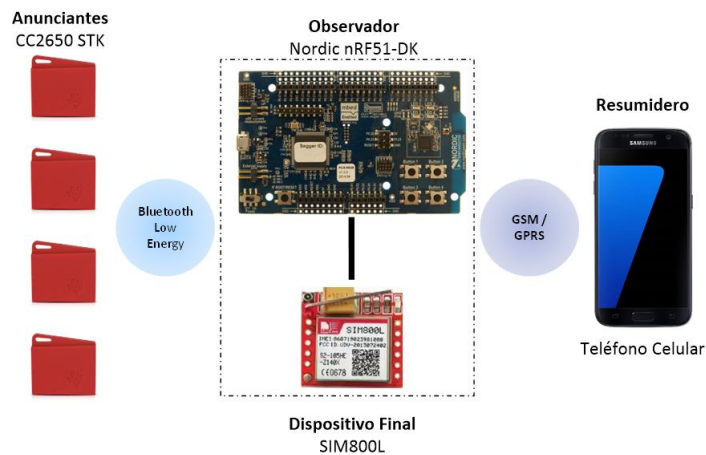
- **Observador BLE – IEEE 802.15.4:** Contiene las mismas funcionalidades del modo de operación anterior, sin embargo, realiza la configuración del transceptor IEEE 802.15.4 con el fin de enviar la información de localización a través del enlace IEEE 802.15.4 establecido. En la Figura 19 se muestra el esquema de la implementación experimental utilizada con los transceptores IEEE 802.15.4.



**Figura 19.** Esquema experimental del dispositivo tipo observador BLE con transceptor IEEE 802.15.4.



- **Observador BLE– GSM (UDP):** Contiene las mismas funcionalidades del Observador BLE - LoRa, sin embargo, realiza la configuración del transceptor GSM con el fin de enviar la información de localización a través del protocolo UDP para una comunicación cliente/servidor.
- **Observador BLE – GSM (SMS):** Contiene las mismas funcionalidades del modo de operación anterior, sin embargo, se realiza la configurar del transceptor GSM con el fin de enviar la información de localización a través de mensajes de texto SMS. Se utilizó el mismo esquema experimental de la tecnología GSM para ambos modos (SMS y UDP), mostrado en la Figura 20.



**Figura 20.** Esquema experimental del dispositivo tipo observador BLE con transceptor GSM.

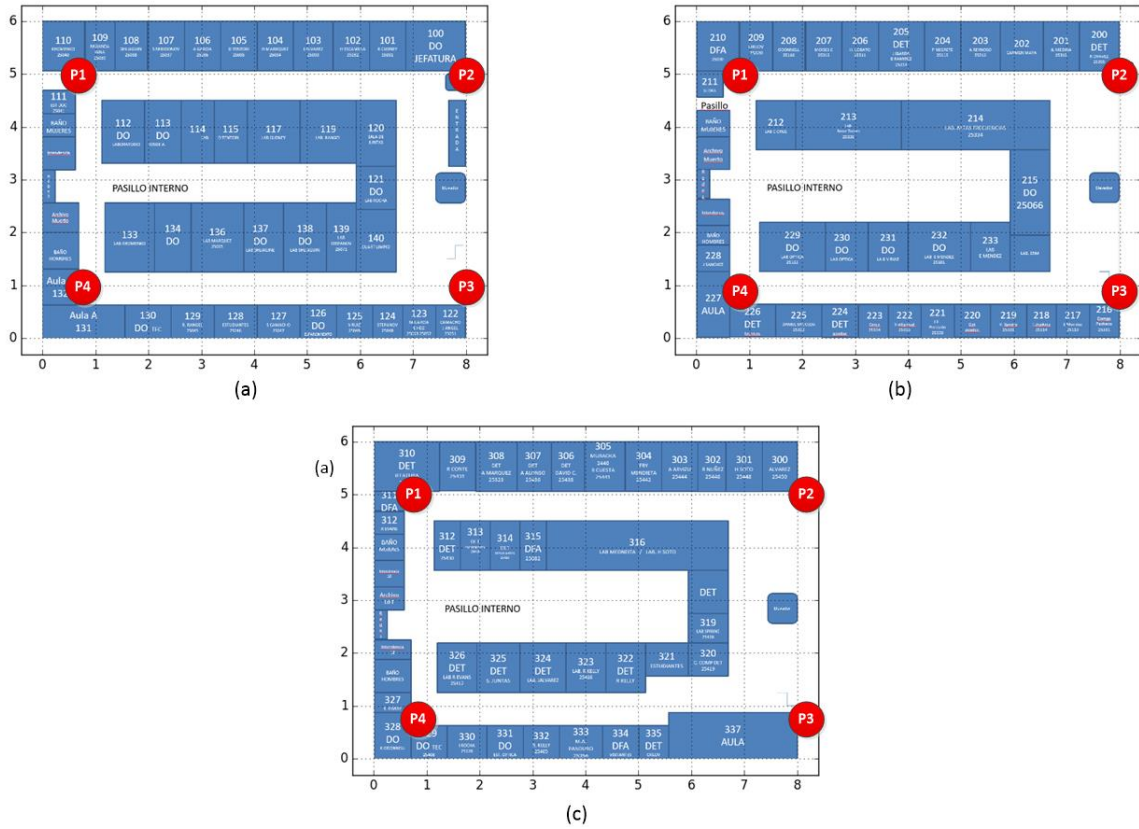
### 5.3. Descripción de los escenarios de prueba experimental

Para evaluar el desempeño de la arquitectura propuesta con los diferentes radios se tomaron en cuenta las métricas: consumo de energía, número de paquetes perdidos y cobertura. Las tres métricas fueron obtenidas tanto en un escenario fijo como en un escenario móvil. En las siguientes subsecciones se detallan ambos escenarios, así como las consideraciones realizadas para la implementación del algoritmo de detección de caídas.

#### 5.3.1. Detección de caídas y localización

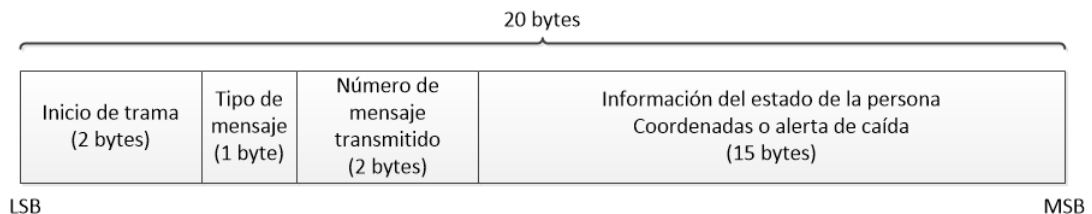
Como se mencionó anteriormente, se implementó el algoritmo WCL para la localización en interiores. La precisión de la posición calculada es dependiente de la velocidad de desplazamiento y de la cantidad de información (beacons) recibida desde diferentes fuentes. Para el caso particular de la cama de pruebas implementada para este trabajo de investigación, se hicieron las siguientes consideraciones para cada uno

de los dispositivos anunciante: 1) Se envían paquetes fano con un tamaño de paquete máximo de 20 bytes cada 20 ms; 2) cada dispositivo conoce su coordenada, la cual permanece fija dentro del edificio. Se desplegaron 4 dispositivos anunciante en cada planta del edificio, con la distribución que se muestra en la Figura 21.



**Figura 21.** Coordenadas de posicionamiento de los dispositivos BLE anunciante en: (a) primera planta, (b) segunda planta y (c) tercera planta del edificio de Física Aplicada.

Como se mencionó en el capítulo anterior, generalmente los algoritmos de detección de caída solo envían una alarma cuando se detecta una situación de riesgo. Por lo tanto, para efectos de evaluación, la detección de caídas es emulada de forma manual. El mensaje de alerta de caída se envía al presionar un botón de la tarjeta Nordic nRF51-DK, emulando la caída del paciente. Este mensaje de alerta (Figura 22) tiene un tamaño de 20 bytes considerando el overhead de la capa física y la capa de enlace de datos.



**Figura 22.** Formato de la carga útil.

### 5.3.2. Escenario 1. Pruebas de consumo de batería

Este escenario considera un dispositivo tipo Observador BLE que mantuvo fija su posición dentro del edificio. El esquema de evaluación es el que se planteó en las Figuras 18, 19 y 20, respectivamente para las tecnologías LoRa, IEEE 802.15.4 y GSM.

Para energizar al dispositivo tipo observador se utilizó una batería de polímero de litio, también denominada batería Li-Po, con las características que se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Características de la fuente de alimentación.

<b>Característica</b>	<b>Batería LiPo</b>
<b>Voltaje nominal</b>	3.7 V
<b>Capacidad (C)</b>	2000 mAh
<b>Tipo de conector</b>	2 pin JST-PH
<b>Tasa de descarga máxima</b>	2C
<b>Temperatura de operación</b>	-25 a 60 °C

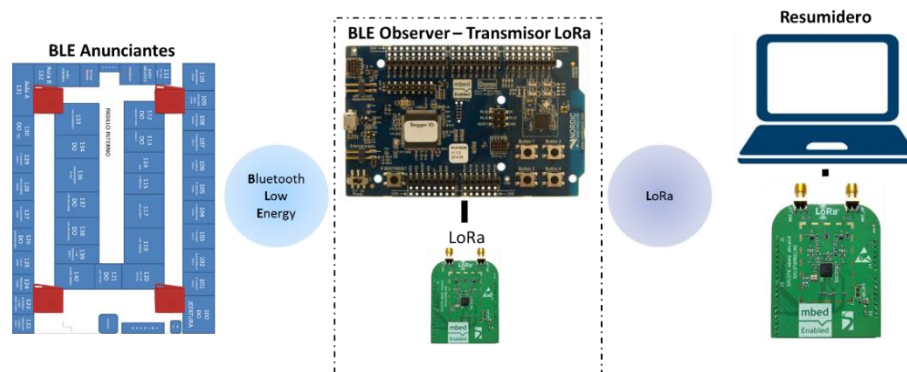
Antes de cada experimento se cargó completamente la batería del observador. En cada experimento se registran datos como el tiempo de funcionamiento del sistema (desde el inicio del experimento hasta que la carga de la batería se agota) y número de paquetes perdidos para cada una de las tecnologías a evaluar. Durante el tiempo de duración del experimento, el observador BLE realiza el procesamiento de los paquetes fano recibidos de los dispositivos anunciantes para el cálculo de la posición. La información de posicionamiento es transmitida cada segundo hacia un nodo resumidero donde se van contabilizando el número de paquetes recibidos para cada una de las tecnologías a evaluar. El dispositivo resumidero con los transceptores de LoRa e IEEE 802.15.4 fue instalado en el techo del edificio de Física Aplicada, siendo colocado en el centro del mismo. Para el resumidero GSM con mensajes SMS se utilizó un teléfono celular que fue recibiendo los mensajes de localización, mientras que para el resumidero GSM con socket UDP se utilizó un servidor virtual el cual fue programado en lenguaje Python. Este servidor contaba con una IP pública y un puerto en donde fue posible recibir los paquetes UDP del transceptor GSM, ese servidor también fue utilizado en las pruebas fijas de consumo.

### 5.3.3. Escenario 2. Pruebas en un escenario con movilidad

Este escenario utiliza un dispositivo tipo observador BLE en el que se realiza la captura de los paquetes faros y el procesamiento del algoritmo de localización. Los 4 dispositivos tipo anunciantes BLE fueron desplegados en las esquinas de cada una de las plantas del edificio de Física Aplicada, tal como se muestra en las Figuras 23. El escenario de despliegue inicial utilizado en este escenario es igual al del escenario fijo, incluyendo la carga completa de la batería Li-Po.

Una vez que se inicia el experimento, el observador BLE se desplaza a través del edificio de Física Aplicada. Se realizó un recorrido a través de las tres plantas del interior del edificio de Física Aplicada, el cual tuvo duración de 5 minutos por planta. Dicho recorrido se realizó a una velocidad promedio de 2 m/s para cada una de las tecnologías a evaluar.

Durante el experimento se contabilizó el número de paquetes transmitidos por el dispositivo tipo observador. Además, en el dispositivo resumidero se registró el número de paquetes recibidos para el cálculo del porcentaje de paquetes perdidos. Esto con el fin de evaluar qué tanto soporta la movilidad del nodo en cada una de las tecnologías. De manera adicional, se realizó un recorrido alrededor del exterior del edificio de Física Aplicada para evaluar las capacidades de las tecnologías cuando la persona sale del edificio.



**Figura 23.** Esquema experimental para pruebas de movilidad utilizando dispositivos LoRa.

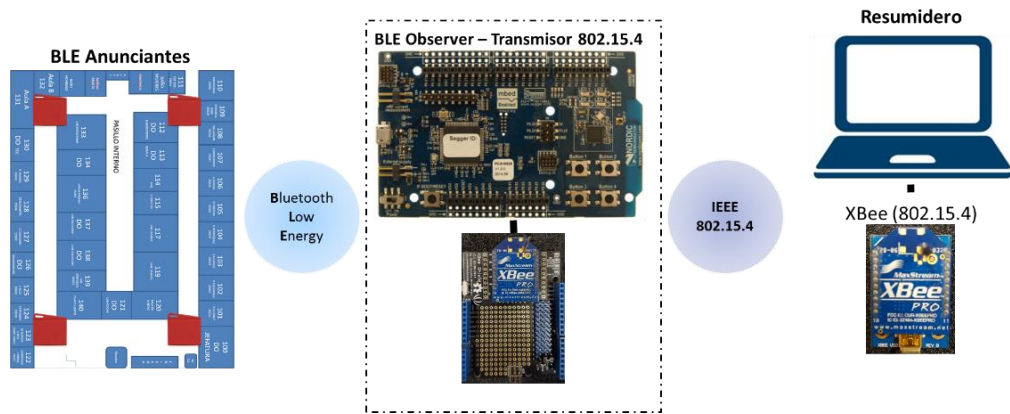


Figura 24. Esquema experimental para pruebas de movilidad utilizando dispositivos IEEE 802.15.4

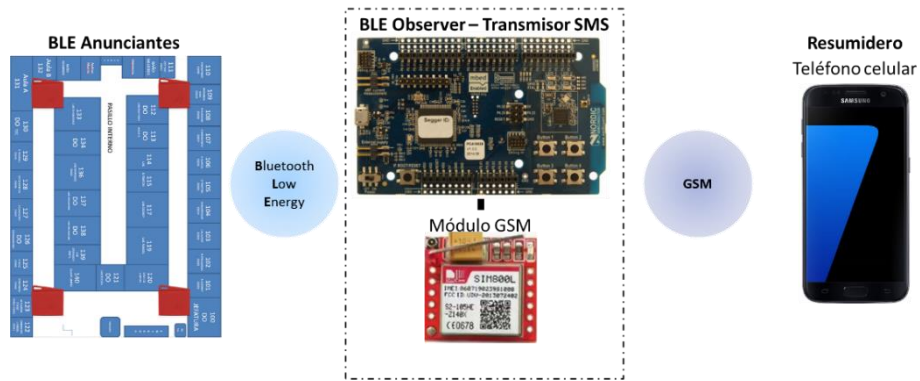


Figura 25. Esquema experimental para pruebas de movilidad utilizando dispositivo GSM con SMS.

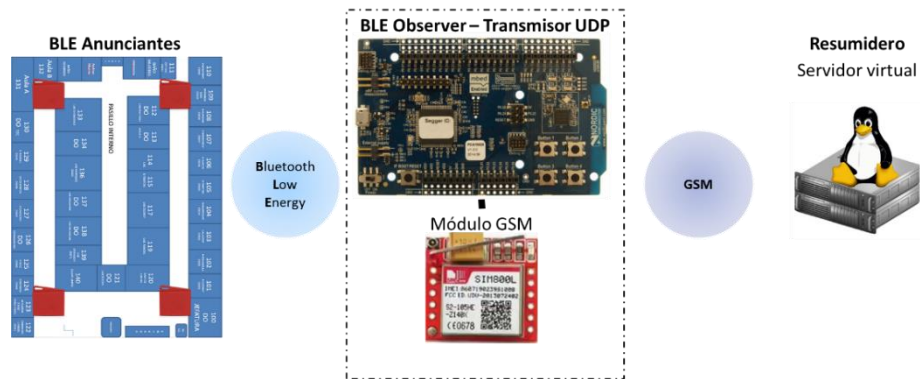


Figura 26. Esquema experimental para pruebas de movilidad utilizando dispositivos GSM con UDP.

### 5.3.4. Escenario 3. Pruebas de cobertura

Para las pruebas de cobertura se tomaron en cuenta 8 puntos distribuidos por cada una de las plantas en todo el edificio de Física Aplicada, además, se tomaron también 8 puntos en el exterior (Figura 28). De igual manera, se utilizó el dispositivo tipo observador BLE sólo que ahora no contaba con la función del procesamiento del algoritmo de localización. Nuevamente, se utilizó un dispositivo resumidero para LoRa e IEEE 802.15.4 de igual manera situados en el techo del edificio y lo más cercano posible al centro del mismo.

El dispositivo tipo observador BLE se situó en cada punto del edificio mostrado en la Figura 27 y 28, y en cada punto se transmitió un paquete de información de 30 bytes a una frecuencia de 1 Hz hacia el resumidero, registrando el valor de RSSI en cada posición. Se tomaron mediciones del RSSI de los paquetes recibidos por 5 minutos en cada uno de los puntos y se obtuvo el valor promedio de toda la medición.

Cabe mencionar que no se realizaron pruebas de cobertura para la tecnología GSM dado que está relacionada a la posición de la antena del proveedor de telefonía celular.



Figura 27. Puntos de medición en el interior.



**Figura 28.** Puntos de medición en el exterior.

#### 5.4. Resumen

En este capítulo se presentaron los escenarios propuestos para evaluar la tecnología LoRa y establecer si es posible utilizar dicha tecnología en la aplicación propuesta. Específicamente, se detalló la implementación de la cama de prueba para realizar los experimentos en escenario fijo y móvil. De manera adicional, se presentaron las características del experimento que se llevó a cabo para evaluar la cobertura de LoRa y ZigBee, esto a través de la métrica de porcentaje de paquetes recibidos exitosamente y de la métrica de duración de batería. Antes de cada uno de los experimentos la batería Li-Po se cargó completamente y el experimento finalizó cuando se descargó completamente la batería.

Por otro lado, para las pruebas de cobertura, se enviaron paquetes a una frecuencia de 1hz durante 5 minutos en 8 diferentes puntos dentro del edificio de Física Aplicada de CICESE y 8 puntos fuera del mismo. De esta forma, la cobertura de ZigBee y LoRa se evaluará en el siguiente capítulo con base en el promedio del porcentaje de paquetes recibidos-





## Capítulo 6. Resultados de la cama de pruebas experimental

### 6.1. Pruebas de consumo de batería

Al realizar las pruebas se consideraron dos parámetros para la evaluación: autonomía del sistema y porcentaje de paquetes perdidos. Con esta información se obtuvo la energía consumida por transmisión por cada byte, es decir, la cantidad efectiva de energía consumida para transferir cada byte de información de su origen hasta el resumidero en función del tiempo, siendo calculada mediante la ecuación 8.

$$E_b(t) = \frac{E_0}{N_b(t)} \quad (8)$$

Donde:

$E_0$  = Energía promedio consumida en todo el experimento.

$N_b$  = Número de bytes que han sido recibidos en el resumidero.

Tomando esto en cuenta, los resultados de la autonomía del sistema obtenidos en las pruebas fijas de consumo se muestran en la Tabla 7.

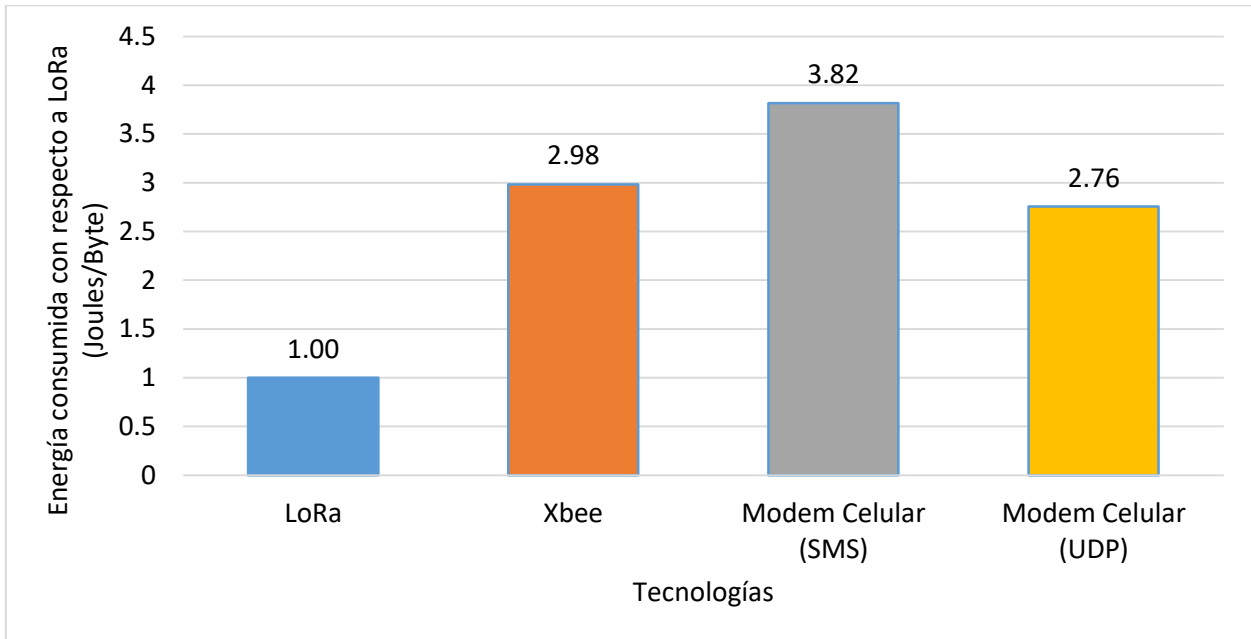
**Tabla 7.** Resultados de la prueba fija de consumo considerando un envío de 2 paquetes por segundo.

Parámetros	Tecnologías a evaluar			
	LoRa	IEEE 802.15.4	GSM (SMS)	GSM (UDP)
<b>Autonomía (horas)</b>	95 horas, 31 minutos	15 horas, 55 minutos	18 horas, 46 minutos	18 horas, 17 minutos
<b>No. paquetes transmitidos</b>	44,384	14,877	11,627	16,107
<b>Porcentaje de paquetes perdidos (%)</b>	0.3132	13.4637	N/A	0.010
<b>Energía consumida por transmisión por byte (Joule/Byte)</b>	0.03	0.1035	0.1146	0.0827

Se puede observar que LoRa se desempeñó de mejor manera en términos de autonomía del sistema en comparación con el resto de las tecnologías evaluadas. Por ejemplo, LoRa obtuvo una autonomía del sistema de 95 horas y 31 minutos, mientras que IEEE 802.15.4 obtuvo 15 horas y 55 minutos, siendo una diferencia de 79 horas y 36 minutos. Con respecto a GSM se obtuvo una diferencia de 77 horas y 14 minutos de autonomía. Adicionalmente, en la tabla 5 se puede observar que con un número de 44,384 paquetes transmitidos se obtuvo solo un 0.3132% de paquetes perdidos, superando por mucho los resultados obtenidos al evaluar IEEE 802.15.4 (con un 13.4637 por ciento de paquetes perdidos de los 14,877 paquetes transmitidos), esto es cerca de 42 veces más de paquetes perdidos con respecto a LoRa.

Con respecto a GSM con UDP, se puede observar que se obtuvo un porcentaje de sólo 0.010 paquetes perdidos, siendo este menor al obtenido con LoRa. Sin embargo, la autonomía del módulo es aproximadamente 5.22 veces menor. Se debe mencionar que no se muestra el porcentaje de paquetes perdidos para las pruebas de GSM con SMS dado que el resumidero es un teléfono celular y este tiene un límite de 1000 mensajes SMS. Por lo que no fue posible generar la métrica sin detener continuamente el experimento, generando un consumo extra por el encendido de la pantalla para monitorizar el proceso.

En la Figura 29 se muestran la comparación de la energía consumida por transmisión por cada byte para las diferentes tecnologías de transmisión consideradas. Tomando en cuenta la energía consumida por LoRa como base, se puede observar que el resto de las tecnologías tienen más del doble de consumo de energía. Por ejemplo, GSM utilizando paquetes UDP consume aproximadamente 2.75 más energía por byte que LoRa. Para el resto de las tecnologías el consumo de energía es mayor con respecto a IEEE 802.15.4 y GSM utilizando mensajes SMS. Se aprecia que con la tecnología GSM utilizando SMS se obtuvo una mayor energía consumida por byte dado a que las rutinas de envío de SMS requieren de un pequeño retardo entre cada comando para la transmisión de cada paquete de información. Es por ello que se obtuvieron menor número de paquetes transmitidos en comparación con GSM utilizando UDP.



**Figura 29.** Comparación de energía consumida por transmisión por byte.

En la tabla 6 se muestra la comparación de consumo de corriente promedio por hora para cada una de las tecnologías a evaluar. Para la estimación del consumo corriente promedio por hora se toma en cuenta la capacidad máxima de la batería entre la autonomía del sistema. Utilizando la ecuación 8 se calculó el consumo promedio para cada una de las tecnologías.

$$\text{Consumo promedio (mA)} = \frac{\text{Capacidad de la batería (mAh)}}{\text{Tiempo de uso (h)}} \quad (9)$$

El parámetro de consumo de corriente promedio nos indica la cantidad de corriente promedio que consume el sistema hasta que la batería agota su almacenamiento interno de energía. Se puede observar que, en comparación con IEEE 802.15.4, LoRa tiene mejor desempeño de hasta 6 veces más con relación al consumo de corriente promedio por hora. Pasa lo mismo con GSM, en donde LoRa muestra hasta 5 y 5.2 veces mayor autonomía con relación a SMS y UDP, respectivamente. Se puede observar en la Tabla 7 y 8, que la tecnología GSM presenta un desempeño similar para SMS y UDP en cuestión de autonomía, energía por byte y en consumo corriente promedio, siendo el desempeño de GSM con UDP ligeramente mejor. Esto se puede atribuir a que el envío de GSM con UDP requiere de menor cantidad de comandos en el transceptor a la hora de enviar la información.

La información que proporciona el consumo de corriente es la cantidad de corriente que el sistema exige a su fuente de alimentación, en este caso la batería utilizada. Por lo tanto, utilizar la tecnología LoRa tiene

mejor desempeño en términos de autonomía dado que es la tecnología que exige menor corriente de la fuente de alimentación. Esto se traduce directamente en que el tiempo que es necesario para recargar o cambiar la batería es mayor para LoRa que para las otras tecnologías.

**Tabla 8.** Tiempo de vida del sistema.

Parámetros	Tecnologías a evaluar			
	LoRa	IEEE 802.15.4	GSM (SMS)	GSM (UDP)
<b>Tiempo de uso (Horas)</b>	95.35	15.92	18.77	18.28
<b>Consumo de corriente promedio (mA) por hora</b>	20.97	125.645	106.57	109.39

## 6.2. Pruebas en un escenario con movilidad

Para analizar el desempeño de LoRa en un ambiente con movilidad en donde la conectividad de los dispositivos en la red es de suma importancia, se realizó la prueba del escenario planteado en la sección 5. El recorrido tuvo una duración de 5 minutos por cada planta del edificio. La frecuencia de transmisión de las coordenadas fue de 1 Hz. Se contabilizaron el número de paquetes perdidos en el interior de cada una de las plantas del edificio y en el perímetro exterior del edificio.

En la Tabla 9 se muestran los resultados de este escenario. Se puede observar que la tecnología LoRa presenta una tasa de pérdida de paquete menor a las demás tecnologías en la evaluación dentro y fuera del edificio con respecto a IEEE 802.15.4 y GSM (SMS). Es importante mencionar que, a diferencia de las pruebas de consumo sin movilidad, en este caso se enviaban paquetes solo durante 5 minutos. Por lo que si fue posible obtener el % de paquetes perdidos para el caso de GSM con SMSs.

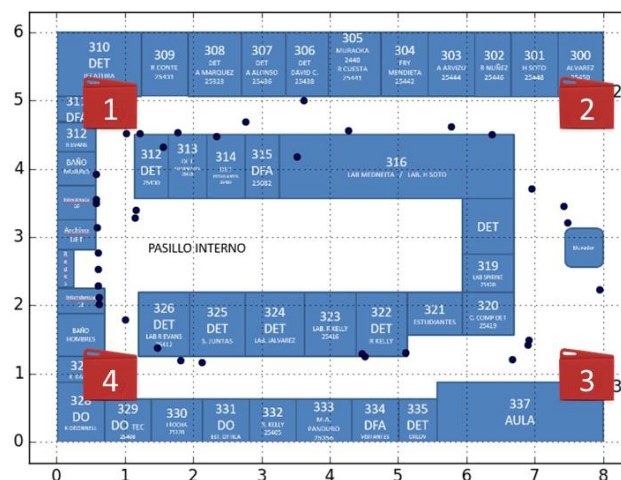
**Tabla 9.** Resultados de la prueba de movilidad.

	Porcentaje de Paquetes Perdidos			
	LoRa	IEEE 802.15.4	GSM (UDP)	GSM (SMS)
Primera planta	1.00	100.00	1.67	9.33
Segunda planta	0.00	99.33	0.67	4.00
Tercera planta	0.67	94.33	0.00	3.33
Exterior del edificio	1.00	100.00	1.67	21.00

Para el caso de GSM (UDP) se obtuvo un mejor desempeño del sistema que IEEE 802.15.4 y que GSM con SMS, pero no mejor que con LoRa. La tecnología que obtuvo peor desempeño fue IEEE 802.15.4 ya que obtuvo 100 por ciento de paquetes perdidos en la primera planta y el perímetro exterior del edificio. Esto es debido que IEEE 802.15.4 no fue diseñado para transmisión de señales para interiores a estas distancias.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en el primer escenario en cuestión de autonomía del sistema y de paquetes perdidos considerando movilidad, se demuestra que con la arquitectura del sistema utilizando la tecnología de LoRa se obtiene un sistema robusto y con una buena autonomía con respecto a las otras tecnologías evaluadas.

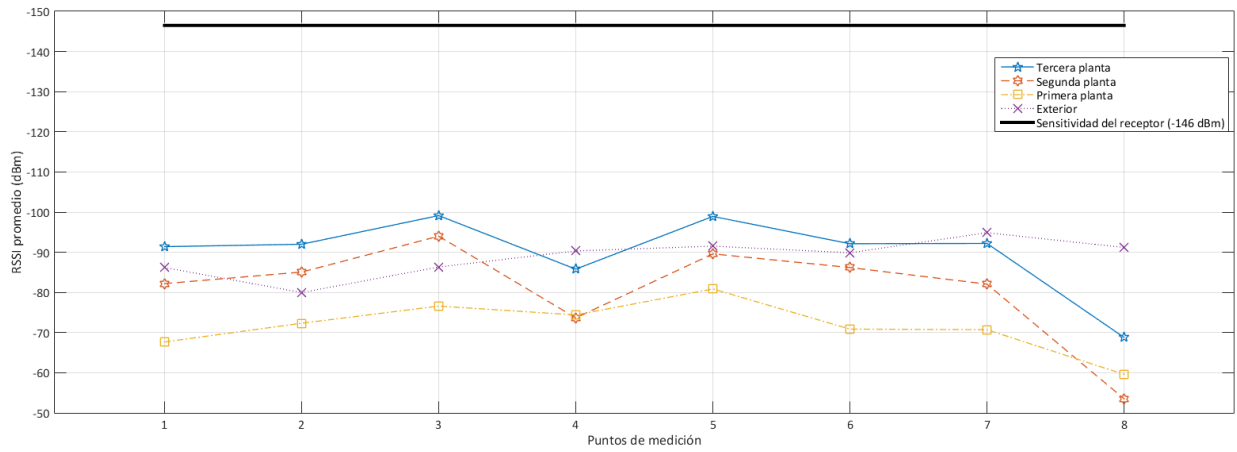
En la Figura 30 se presenta un ejemplo del despliegue de datos en la interfaz gráfica que se desarrolló para la visualización de la coordenada actual del dispositivo tipo observador BLE dentro del edificio.

**Figura 30.** Pruebas de movilidad en la tercera planta.

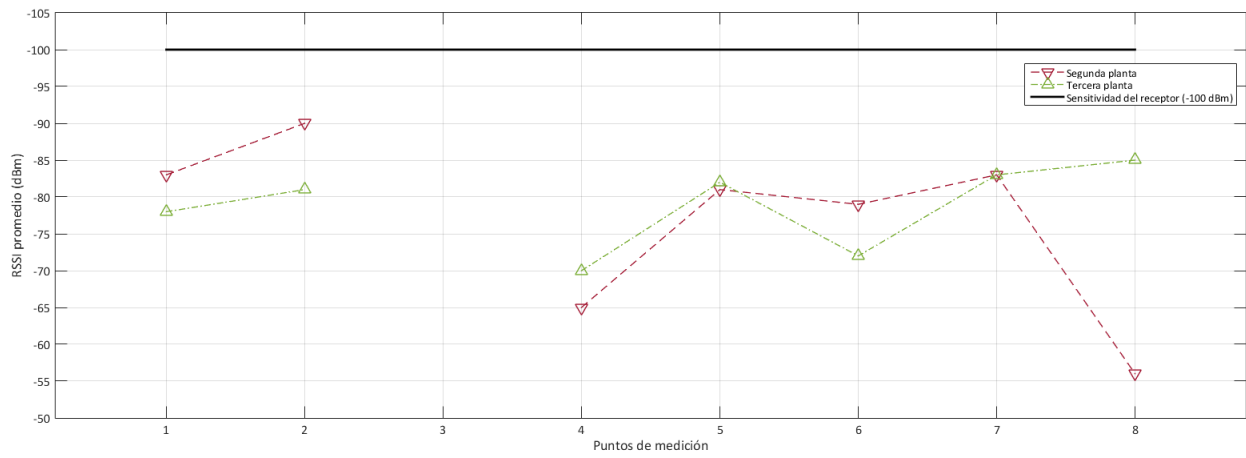
### 6.3. Pruebas de cobertura

Para analizar el desempeño de LoRa en términos de cobertura se utilizó un tercer escenario, en el cual se considera sólo la implementación del dispositivo tipo observador BLE y el dispositivo concentrador, (sin la implementación del algoritmo de localización). En este escenario no fueron utilizados los dispositivos tipo anunciantes BLE. Este escenario se plantea en la sección 5.3 del capítulo 5. En la Figura 31 y 32 se muestran las mediciones de RSSI promedio en 8 puntos en cada planta del edificio de Física Aplicada al igual que en su exterior para las tecnologías LoRa e IEEE 802.15.4, respectivamente. Se puede observar que dentro del edificio de Física Aplica se obtuvieron mediciones de RSSI para la tecnología LoRa en todos los puntos elegidos para la prueba (ver sección 5.3). Las mediciones obtenidas indican que se tiene cobertura a través de las tres plantas del edificio al igual que en el exterior del mismo. Por lo tanto, esta tecnología puede ser utilizada para la transmisión de información dentro y fuera de un edificio relativamente grande como lo es Física Aplicada. Por otro lado, para IEEE 802.15.4 se obtuvieron mediciones solo en la tercera y segunda planta del edificio dado que la tecnología no logró tener cobertura en la primer planta, además no se registró medición en el punto 3 de la tercer y segunda planta debido a las limitaciones de cobertura de la tecnología, ocasionadas por objetos que obstruyeron la propagación de la señal en dicho punto. Esto se debe a que los dispositivos IEEE 802.15.4 tienen un alcance máximo de alrededor de 100 metros pero con línea de visibilidad directa. Además, se puede observar como su alcance máximo se ve afectado por diferentes objetos que se encuentran dentro del edificio como paredes, equipos de medición, escritorios, etc.

De acuerdo a los resultados obtenidos y mostrados en las Figuras 31 y 32, es factible utilizar la tecnología LoRa en un ambiente de interiores y exteriores de un edificio como Física Aplicada. Cuando se considera LoRa, los usuarios pueden utilizar el sistema por un mayor periodo de tiempo en comparación con las tecnologías que son utilizadas actualmente como IEEE 802.15.4 y telefonía celular. Otro factor que hay que tomar en cuenta es la sensibilidad de los receptores, la cual es la mínima potencia de la señal detectada en la entrada del receptor que permita demodular dicha señal. El radio de LoRa cuenta con una sensibilidad de -148 dBm mientras que el radio de IEEE 802.15.4 con solo -100 dBm. En la Figura 30 se puede observar que el receptor LoRa recibe paquetes en todos los puntos con una potencia mayor a los -100dBm. La potencia de la señal recibida para IEEE 802.15.4 obtenida en los diferentes puntos de medición es mostrada en la Figura 32. Comparando los resultados de ambas tecnologías, se puede establecer que para IEEE 802.15.4 la diferencia entre la potencia recibida y la sensibilidad mínima es mayor que para LoRa. Es decir, el margen en el presupuesto de enlace es menor para IEEE 802.15.4. Esto se puede traducir en una mayor tasa de errores en la recepción o en una mayor vulnerabilidad a los obstáculos.



**Figura 31.** Mediciones de RSSI promedio en el interior y exterior del edificio de Física Aplicada utilizando los transceptores LoRa.



**Figura 32.** Mediciones de RSSI promedio en el interior y exterior del edificio de Física Aplicada utilizando los transceptores IEEE 802.15.4.





## Capítulo 7. Conclusiones y trabajo a futuro

---

### 7.1. Introducción

Durante el desarrollo de este trabajo de investigación fueron surgiendo diversos cuestionamientos a los cuales se les dio la mejor solución posible utilizando las herramientas conocidas y las adquiridas a lo largo del trabajo de investigación. En este capítulo se resumen las conclusiones más importantes derivadas de los resultados obtenidos.

Las aportaciones plasmadas en este trabajo establecen una metodología de diseño, desarrollo y evaluación de un sistema de localización y detección de caídas basado en una tecnología LPWAN para el monitoreo de adultos mayores.

### 7.2. Conclusiones

En esta sección se presentan las principales conclusiones y aportaciones desarrolladas durante el proceso de investigación para el diseño, desarrollo y evaluación de la cama de pruebas experimental para localización.

#### 7.2.1. Sobre el diseño de la cama de pruebas

Se observó la ventaja de utilizar la arquitectura de red Estrella de LoRa, ya que minimiza la inundación de paquetes en la red, dado que la información sólo requiere viajar de nodo final al resumidero. Otra ventaja de utilizar esta arquitectura es que minimiza el consumo de energía dado que no se requieren nodos que trabajen como repetidores o como enrutadores, lo cual agrega un mayor procesamiento computacional lo que se ve reflejado en el incremento del consumo de energía.

Es importante mencionar que, en este trabajo de investigación no se desarrolló el despliegue de una red malla para la tecnología IEEE 802.15.4. Esto es importante dado que se requiere un mayor número de dispositivos IEEE 802.15.4 que realicen la función de enrutadores, añadiendo mayor costo computacional al sistema, aumentando su costo y además la complejidad, ya que sería necesario implementar un algoritmo de enrutamiento y un mecanismo de traspasos, sólo para competir con las prestaciones que ofrece LoRa en esta aplicación en lo particular.

Con respecto a la red celular, esta tecnología no presenta una propuesta actual en el mercado enfocada al bajo consumo de energía. Actualmente, los sistemas que utilizan la red celular hacen uso de teléfonos celulares inteligentes, los cuales tienen la característica de no estar completamente optimizados para bajo consumo, por lo que requieren de recargar su batería de una a dos veces al día dependiendo de su uso.

### **7.2.2. Sobre la implementación de la cama de pruebas experimental**

Una vez definida la arquitectura de la cama de pruebas experimental y las tecnologías utilizadas para la transmisión, se procedió a buscar soluciones para desarrollar físicamente la implementación de la cama de pruebas para cada una de las tecnologías a evaluar.

Debido a que LoRa es un estándar de reciente liberación, las soluciones que ofrecen actualmente los fabricantes no cumplen con lo estipulado en el estándar (por ejemplo, limitación de la configuración de parámetros de transmisión y recepción). Además, al inicio del desarrollo de este proyecto no existían modelos matemáticos ni modelos de simulación desarrollados para esta tecnología.

La implementación de un algoritmo de localización en interiores no es una tarea trivial debido a que existen muchos factores a tomar en cuenta, como la técnica de estimación de distancias, en donde se trabaja con la fuerza de la señal, la cual se ve afectada por diferentes condiciones, tales como reflexiones de la señal, difracción, multitrayectorias o solapamientos en el canal de radio frecuencia. Mejorar la precisión del sistema implica implementar mecanismos como filtrados y etapa de calibración, lo cual está fuera de los alcances de este trabajo.

Se exploró la tecnología de Bluetooth Low Energy para la implementación del algoritmo de localización. Después de una revisión al estado de arte, esta tecnología fue la opción elegida por sus características de bajo consumo de potencia, además, los canales de radiofrecuencia que utiliza para transmitir la información no se traslapan con los canales de WiFi comúnmente utilizados, por lo que minimiza las pérdidas por interferencia.

Es importante conocer los periféricos de la tarjeta de evaluación a utilizar para así conocer sus limitaciones, en cuestión del número de puertos de comunicación disponibles. Otro punto importante es, conocer la cantidad de corriente eléctrica que es capaz de entregar en sus puertos de entrada/salida, dado que puede ser una gran limitante a la hora de establecer comunicación con ciertos transceptores. Es por ello, que es

pertinente conocer las características de los transceptores para así seleccionar la tarjeta de desarrollo adecuada que cumpla con los requerimientos para el desarrollo del sistema.

Es importante tomar en cuenta la fuente de alimentación a utilizar y conocer sus características como capacidad de descarga para no dañar la batería ni el sistema de procesamiento.

### **7.2.3. Sobre la evaluación de los resultados de la cama de pruebas experimental**

Para obtener una visión más amplia del desempeño de la tecnología LPWAN se realizaron diferentes escenarios de evaluación. Se implementó una cama de pruebas LoRa, IEEE 802.15.4 y telefonía móvil (GSM) y se compararon los resultados bajo los tres escenarios evaluados. Con base en esta comparación, se pudo demostrar que con la implementación de una red LoRa, con la especificación 1.0, se obtuvo una mejora significativa en cuestión de consumo de energía de más 5 veces más comparado con el resto de las tecnologías evaluadas.

Se demostró la capacidad de la tecnología LoRa en escenarios de interiores, mostrando en todos los lugares de prueba un porcentaje menor a 1% de paquetes perdidos, haciéndose notar que el dispositivo final se estuvo moviendo a través de todo el edificio. Se considera un resultado satisfactorio, dado que los paquetes fueron enviados a una potencia de 14 dBm, la cual no es la máxima potencia de transmisión permitida en el estándar.

Comparado con GSM y LoRa, IEEE 802.15.4 obtuvo un pobre desempeño ya que obtuvo hasta 100% de paquetes perdidos, demostrando que aún es necesario agregar más nodos a la red con un mecanismo como enrutamiento y traspasos para que esta tecnología sea confiable en una aplicación de este tipo.

### **7.3. Trabajo a futuro**

Aún existen áreas de oportunidad que pueden explorarse para el despliegue de redes inalámbricas en escenarios de monitoreo, rastreo y detección de caídas. En esta sección se muestran las recomendaciones para trabajo a futuro que pueden extenderse a partir de este trabajo de investigación.

Tomando como base la cama de pruebas desarrollada, es posible evaluar diferentes técnicas de estimación de distancia para buscar una que otorgue mejor precisión, o realizar una combinación de ellas para agregar robustez al sistema de localización.

Implementación de un algoritmo de detección de GPS que sea capaz de seleccionar entre localización en interior y exterior para de esta manera minimizar el consumo de energía dado que no es necesario siempre tener encendido el dispositivo GPS.

Reducir los componentes utilizados en la implementación práctica. Es posible realizar el diseño de un sistema embebido con solo los componentes necesarios que cumpla solo con los requerimientos de procesamiento del algoritmo de localización, detección de caídas y rutinas para el control y comunicación de los transceptores.

## Literatura citada

---

- Benkic, K., Malajner, M., Planinsic, P., & Cucej, Z. (2008). Using RSSI value for distance estimation in wireless sensor networks based on ZigBee. *Systems, Signals and Image Processing, IWSSIP*, (February). <http://doi.org/10.1109/IWSSIP.2008.4604427>
- Cheng, L., Wu, C., Zhang, Y., Wu, H., Li, M., & Maple, C. (2012). A Survey of Localization in Wireless Sensor Network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, 12. <http://doi.org/10.1155/2012/962523>
- Delahoz, Y. S. antiago, & Labrador, M. A. ngel. (2014). Survey on fall detection and fall prevention using wearable and external sensors. *Sensors*, 14(10), 19806–19842. <http://doi.org/10.3390/s141019806>
- Dobbins, R., Garcia, S., & Shaw, B. (2011). *Software Defined Radio Localization Using 802.11-style Communications*. Worcester Polytechnic Institute. Retrieved from [http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042811-163711/unrestricted/NRL\\_MQP\\_Final\\_Report.pdf](http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042811-163711/unrestricted/NRL_MQP_Final_Report.pdf)
- Dobkin, B. H., & Dorsch, A. (2014). The Promise of mHealth: Daily Activity Monitoring and Outcome Assessments by Wearable Sensors. *Neurorehabil Neural Repair*, 25(9), 788–798. <http://doi.org/10.1177/1545968311425908>.The
- Espinoza, A., Reyes, E., Tapia, M., Ruiz, E., Ruiz, J., & Cortez, J. (2016). Performance comparison between simulated and real case scenario of RSSI-Based localization algorithms on a WSA. *IEEE Latin America Transactions*, 14(1), 115–121.
- Faragher, R., & Harle, R. (2015). Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons, 33(11), 2418–2428.
- Han, G., Xu, H., Duong, T. Q., Jiang, J., & Hara, T. (2013). Localization algorithms of Wireless Sensor Networks: A survey. *Telecommunication Systems*, 52(4), 2419–2436. <http://doi.org/10.1007/s11235-011-9564-7>
- Hui, J., & P., T. (2011). Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks, 1–24.
- Hussain, A., Wenbi, R., Lopes, A., Nadher, M., & Mudhish, M. (2015). The Journal of Systems and Software Health and emergency-care platform for the elderly and disabled people in the Smart City. *The Journal of Systems & Software*, 110, 253–263. <http://doi.org/10.1016/j.jss.2015.08.041>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Estadísticas a propósito del día mundial de la población. Retrieved from [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1157/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1157/libro.pdf)
- InteliLIGHT. (2016). inteliLIGHT LoRa Streetlight Control Solution Successfully Passes Field Trials in Szada, Hungary, 1.1, 1–4.
- Kam, M., Suryadevara, N. K., Mukhopadhyay, S. C., & Gill, S. P. S. (2014). WSN based utility System for effective monitoring and control of household power consumption. *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, 1382–1387. <http://doi.org/10.1109/I2MTC.2014.6860973>

- Kau, L. J., & Chen, C. S. (2015). A smart phone-based pocket fall accident detection, positioning, and rescue system. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, *19*(1), 44–56. <http://doi.org/10.1109/JBHI.2014.2328593>
- Lai, C.-F., Chang, S.-Y., Chao, H.-C., & Huang, Y.-M. (2011). Detection of Cognitive Injured Body Region Using Multiple Triaxial Accelerometers for Elderly Falling. *IEEE Sensors Journal*, *11*(3), 763–770. <http://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2062501>
- Link Labs. (2016). Selecting a Wireless Technology For New Industrial Internet of Things Products: A Guide for Engineers and Decision Makers, 11. Retrieved from <http://www.link-labs.com/resources/>
- Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., & Liu, J. (2007). Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, *37*(6), 1067–1080. <http://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.905750>
- Malhi, K., Mukhopadhyay, S. C., Schnepfer, J., Haefke, M., & Ewald, H. (2012). A zigbee-based wearable physiological parameters monitoring system. *IEEE Sensors Journal*, *12*(3), 423–430. <http://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2091719>
- Marco, A., Casas, R., Falco, J., Gracia, H., Artigas, J. I., & Roy, A. (2008). Location-based services for elderly and disabled people. *Computer Communications*, *31*(6), 1055–1066. <http://doi.org/10.1016/j.comcom.2007.12.031>
- México: Secretaría de Salud. (2008). Prevención de Caídas en el Adulto Mayor en el Primer Nivel de Atención, 1–29. Retrieved from [http://www.cenetec.salud.gob.mx/descargas/gpc/CatalogoMaestro/134\\_ISSSTE\\_08\\_caidas\\_adulto\\_mayor/EyR\\_ISSSTE\\_134\\_08.pdf](http://www.cenetec.salud.gob.mx/descargas/gpc/CatalogoMaestro/134_ISSSTE_08_caidas_adulto_mayor/EyR_ISSSTE_134_08.pdf)
- Moreno, P. A., Hernando, M. E., Member, S., & Enrique, J. G. (2015). Design and Technical Evaluation of an Enhanced Location-Awareness Service Enabler for Spatial Disorientation Management of Elderly With Mild Cognitive Impairment. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, *19*(1), 37–43.
- Mubashir, M., Shao, L., & Seed, L. (2013). A survey on fall detection: Principles and approaches. *Neurocomputing*, *100*, 144–152. <http://doi.org/10.1016/j.neucom.2011.09.037>
- Ni Scanail, C., Ahearne, B., & Lyons, G. M. (2006). Long-term telemonitoring of mobility trends of elderly people using SMS messaging. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, *10*(2), 412–413. <http://doi.org/10.1109/TITB.2005.859890>
- Puri, D. (2016). LoRa-based IoT service helps farm co-ops cultivate more land. Retrieved from <http://www.networkworld.com/article/3091069/internet-of-things/lora-based-iot-service-helps-farm-co-ops-cultivate-more-land.html>
- Rashidi, P., & Mihailidis, A. (2013a). A survey on ambient-assisted living tools for older adults. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, *17*(3), 579–590. <http://doi.org/10.1109/JBHI.2012.2234129>
- Rashidi, P., & Mihailidis, A. (2013b). A Survey on Ambient-Assisted Living Tools for Older Adults. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, *17*(3), 579–590. <http://doi.org/10.1109/JBHI.2012.2234129>

- Redondi, A., Chirico, M., Borsani, L., Cesana, M., & Tagliasacchi, M. (2013). An integrated system based on wireless sensor networks for patient monitoring, localization and tracking. *Ad Hoc Networks*, 11(1), 39–53. <http://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.04.006>
- Semtech. (2015a). LoRa. Retrieved from <http://www.semtech.com/wireless-rf/internet-of-things/what-is-lora/>
- Semtech. (2015b). LoRa Modulation Basics. Retrieved from <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>
- Semtech White Paper. (2016). Smart Cities Transformed Using LoRa Technology, 1–6. [http://doi.org/10.1016/S0264-2751\(98\)00050-X](http://doi.org/10.1016/S0264-2751(98)00050-X)
- Solanas, A., Martinez-Balleste, A., Perez-Martinez, P. A., Pena, A. F. de la, & Ramos, J. (2013). m-Carer: Privacy-Aware Monitoring for People with Mild Cognitive Impairment and Dementia. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31(9), 19–27. <http://doi.org/10.1109/JSAC.2013.SUP.0513002>
- Sornin, N., Luis, M., Eirich, T., Kramp, T., & Hersent, O. (2015). LoRaWAN Specification, 1–82. Retrieved from [https://www.lora-alliance.org/portals/0/specs/LoRaWAN Specification 1R0.pdf](https://www.lora-alliance.org/portals/0/specs/LoRaWAN%20Specification%201R0.pdf)
- Swaran, R., & S.N., J. (2013). Time of Arrival Based Localization in Wireless Sensor Networks: A Linear Approach. *Signal & Image Processing : An International Journal*, 4(4), 13–30. <http://doi.org/10.5121/sipij.2013.4402>
- UDOIT. (2016). Smart home Automation. Retrieved from <http://udoit.eu/home-automation/>
- Vargas, C., Mass, J., Espinoza, A., & Ruiz, E. (2015). Performance Evaluation of Localization Algorithms for WSNs. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(3).
- Willis, S., & Kikkert, C. J. (2014). Radio propagation model for Long-range wireless sensor networks Radio Propagation Model for Long-Range Wireless Sensor Networks. *Information, Communications & Signal Processing, 6th International Conference*, (January 2008). <http://doi.org/10.1109/ICICS.2007.4449761>
- Zhu, L., Zhou, P., Pan, A., Guo, J., Sun, W., Chen, X., ... Wang, L. (2015). A Survey of Fall Detection Algorithm for Elderly Health Monitoring. *2015 IEEE 5th International Conference on Big Data and Cloud Computing, BDCloud 2015*, 270–274. <http://doi.org/10.1109/BDCloud.2015.35>