



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Sistema de localización de dispositivos móviles en espacios
cerrados utilizando la tecnología de beacons

presentada por

L.I. Daniel Cervantes Bobadilla

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias de la Computación

Directora de tesis
Dra. Alicia Martínez Rebollar

Codirector de tesis
Dr. Javier Ortiz Hernández

Revisor de tesis
Dr. Máximo López Sánchez

Revisor de tesis
Dr. Juan Francisco Mosiño

Cuernavaca, Morelos, México Mayo de 2023

SEP TecNM CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
RECIBIDO
29 MAR 2023
CMZ
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

Cuernavaca, Morelos, **27/febrero/2023**

No. de Oficio: DCC/043/2023

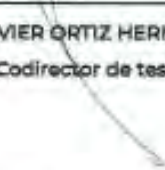
Asunto: Aceptación de documento de tesis CENIDET-AC-004-M14-OFCIO

MARÍA YASMÍN HERNÁNDEZ PÉREZ
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de DANIEL CERVANTES BOBADILLA, con número de control M17CE029, de la Maestría en Ciencias de la Computación, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado **"SISTEMA DE LOCALIZACIÓN DE DISPOSITIVOS MÓVILES EN ESPACIOS CERRADOS UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA DE BEACONS"** y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.




ALICIA MARTÍNEZ REBOLLAR
Directora de tesis



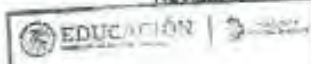
JAVIER ORTIZ HERNÁNDEZ
Codirector de tesis




MÁXIMO LÓPEZ SÁNCHEZ
Revisor 1



JUAN FRANCISCO MOSIÑO
Revisor 2


10 MAR 2023
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
SERVICIO EDUCACIONES
RECIBIDO
ECS


10 MAR 2023
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
SERVICIO EDUCACIONES
RECIBIDO
ECS

c.c.p. Archivo

Cuernavaca, Mor., 09/marzo/2023
No. De Oficio: SAC/052/2023
Asunto: Autorización de impresión de tesis

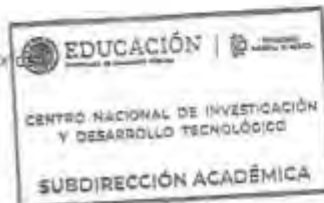
DANIEL CERVANTES BOBADILLA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"SISTEMA DE LOCALIZACIÓN DE DISPOSITIVOS MÓVILES EN ESPACIOS CERRADOS UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA DE BEACONS"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"



CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

C. c. p. Departamento de Ciencias Computacionales
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/LMZ



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Mor., C. R. P. Q. S. D. F. Cuernavaca, Mor., C. R. P. Q. S. D. F.



Dedicatoria

A mis padres Telesforo Cervantes Sánchez y Olivia Bobadilla Navarro por su apoyo y confianza, por ayudarme a cumplir mis objetivos como persona y estudiante, apoyándome y aconsejándome siempre. Mis hijos Kevin Daniel y Naomi Monserrath por ser mi fuerza y motivación de crecimiento. A mi esposa por su apoyo y motivación.

Agradecimientos

A Dios por acompañarme y guiarme en todo momento, y darme la oportunidad de culminar este gran sueño.

Al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por proporcionarme todo lo necesario para mi desarrollo profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que me brindó para realizar mis estudios de maestría.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por brindarme la oportunidad de superarme académicamente en el programa de Maestría en Ciencias de la Computación.

Un especial agradecimiento a mi directora de tesis, la Dra. Alicia Martínez Rebollar y a mi codirector, el Dr. Javier Ortiz Hernández, por sus consejos, observaciones y paciencia para atender mi trabajo de investigación, además, por su amistad, sentido humano y por haberme enseñado el valor de la humildad.

A mis revisores, el Dr. Máximo López Sánchez y el Dr. Juan Francisco Mosiño que fortalecieron el trabajo con sus aportaciones.

Al Dr. Manuel Adam Medina, al Dr. Jarniel García Morales y a la Dra. Marisol Cervantes Bobadilla por confiar en mí, gracias a su apoyo en todo este proceso.

A la Lic. Lorena Ruiz Ramírez por todo el apoyo y disponibilidad brindado durante este proceso.

A mis padres Olivia Bobadilla Navarro y Telesforo Cervantes Sánchez, quienes me brindaron todo su apoyo durante este proceso.

A mi familia por ser mi motor y mi fuerza día con día.

A mis amigos de la maestría que me apoyaron y fortalecieron mis conocimientos.

A todo el personal administrativo del CENIDET por todo el apoyo y disponibilidad brindado durante mi estancia.

Resumen

Con el creciente desarrollo del internet de las cosas, ha incrementado la necesidad de las personas de tener un panorama más amplio de saber su ubicación en espacios cerrados. Como se sabe el sistema de posicionamiento en exteriores por satélite "GPS", ha evolucionado con el paso de los años proporcionando a los usuarios posicionamientos en exteriores de alta precisión. Desafortunadamente, el GPS en espacios cerrados pierde precisión y los datos no son confiables, debido a que la señal proveniente de los satélites no se transmite fácilmente a través de objetos sólidos.

Por lo tanto, en este trabajo de investigación, se presenta un sistema de posicionamiento en espacios cerrados (*indoor*) basado en tecnología *Bluetooth* de Baja Energía, mediante dispositivos *beacons*. Entre otros métodos para determinar la ubicación de un dispositivo móvil en algún lugar dentro de un espacio cerrado, se emplea el algoritmo de trilateración el cual se basa en la potencia de la señal RSSI que emiten los beacons.

Se realizó el desarrollo de una aplicación móvil, misma que permite dar el salto a las ciudades inteligentes. La aplicación es capaz de brindar ayuda a los usuarios para proporcionar su ubicación y la de otros dispositivos móviles, dentro de espacios cerrados, mejorando la experiencia de los usuarios que la utilizan. Dicha aplicación lleva por nombre **Ubico**. Para su correcto funcionamiento, hace uso de un teléfono inteligente por medio del cual recopila la información necesaria del entorno donde se encuentra ubicado, apoyándose de unos dispositivos llamados beacons, que recopilan la información de contexto.

El sistema se compone de 2 aplicaciones para dispositivos móviles. La primera es **Ubico administrador** conformada por 4 módulos; en los cuales se define las zonas para la instalación de los beacons a utilizar, se da de alta a las organizaciones, se dan de alta los beacons a utilizar y por último el módulo de búsqueda, en el que es posible realizar la ubicación de un dispositivo móvil en espacios cerrados. La segunda aplicación **Ubico Usuario** dirigida al usuario se encuentra conformada por un módulo, que permite realizar la búsqueda de dispositivos en espacios cerrados. Ambas aplicaciones cuentan con un registro previo del usuario y del administrador para su acceso a la misma.

Abstract

With the increasing development of the Internet of Things, people need a broader view of their location in enclosed spaces. As is well known, the outdoor satellite Global Positioning System "GPS" has evolved over the years to provide users with highly accurate outdoor positioning. Unfortunately, GPS in enclosed spaces loses accuracy, and the data is unreliable since the signal from the satellites is not easily transmitted through solid objects.

Therefore, this research presents an indoor positioning system using beacons devices based on Bluetooth Low Energy (BLE) technology. The trilateration algorithm is used to determine the location of a mobile device somewhere inside an enclosed area based on the power of the Received Signal Strength Indicator (RSSI) signal emitted by the beacons.

A mobile application was developed, making it possible to leap to intelligent cities. The application can provide the location of the user's device and that of other work team mobile devices in indoor spaces, improving the user experience. The application is called "Ubico." For its correct operation, it uses a smartphone to collect the necessary information about the environment where it is located, supported by beacons devices, which collect context information.

The system consists of 2 applications for mobile devices. The first is Ubico for administrators, and the second is the Ubico application directed to the user. Ubico for administrators is composed of 4 modules, in which the zones for the installation of the beacons to be used are defined, the organizations are registered, the beacons to be used are registered, and finally, the search module, in which is possible to locate a mobile device in closed spaces. The Ubico users application consists of a module that allows searching for devices in closed spaces. Both applications require prior registration of the user and the administrator for access to the application.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Objetivo	2
1.2.1 Objetivos específicos.....	3
1.3 Organización de la tesis.....	3
2. MÁRCO TEÓRICO.....	6
2.1 Algoritmos para localización en espacios cerrados.....	6
2.1.1 Algoritmo tiempo de llegada (ToA)	6
2.1.2 Algoritmo tiempo de ida y vuelta del vuelo (RtoF)	6
2.1.3 Algoritmo angulo de llegada (AoA)	7
2.1.4 Algoritmo indicador de intensidad de señal recibida (RSSI)	7
2.2 Técnicas para localización en espacios cerrados	7
2.2.1 Técnica triangulación	7
2.2.2 Técnica de trilateración.....	8
2.2.3 Técnica de proximidad	9
2.2.4 Fingerprinting	9
2.3 Plataformas para implementación.....	10
2.3.1 <i>Bluetooth</i> (BLE).....	10
2.3.2 WIFI para espacios cerrados	10
2.3.3 Beacons	10
3. ESTADO DEL ARTE	13
3.1 Aspectos descriptivos de los trabajos del estado del arte en geolocalización en espacios cerrados.....	13
3.2 Una revisión de los sistemas de posicionamiento en interiores.....	13
3.3 Un esquema de localización interior diferencialmente privado con fusión de <i>fingerprints</i> WiFi y <i>bluetooth</i> en la computación de borde.....	16
3.4 Localización en espacios cerrados mediante <i>Bluetooth</i> de baja energía para grandes zonas industriales e infraestructuras limitadas.....	18
3.5 Una aplicación IoT de bajo consumo que utiliza beacons para la localización en espacios cerrados.....	19
3.6 Modelización del comportamiento de un sistema de localización en espacios cerrados basado en beacons	21

3.7 Localización de peatones en espacios cerrados basada en información de contacto mediante beacons <i>Bluetooth</i> de baja energía	22
3.8 Comparación de técnicas de trilateración y aprendizaje supervisado para BLE.....	23
3.9 Exploración del espacio de diseño de un sistema de localización en espacios cerrados basado en IA multimodelo.....	25
3.10 Localización precisa en espacios cerrados sin cuadrícula basada en múltiples beacons <i>Bluetooth</i> y aprendizaje automático.....	26
3.11 Posicionamiento preciso en espacios cerrados basado en <i>beacons Bluetooth</i> mediante aprendizaje automático	27
3.12 Comparativa de trabajos relacionados	28
3.13 Tabla comparativa de trabajos relacionados con este proyecto	31
Localización de peatones en espacios cerrados basada en información de contacto mediante <i>beacons Bluetooth</i> de baja energía	31
4. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN PARA UBICACIÓN EN ESPACIOS CERRADOS.....	34
4.1 Descripción general de la metodología a utilizar	34
4.3 Algoritmo de localización	36
4.3.1 Localización a partir de la señal RSSI.....	36
4.3.2 Algoritmo de trilateración	37
4.4 Implementación	39
4.4.1 Ubico Administrador	39
4.5 Pruebas.....	46
5. PRUEBAS Y RESULTADOS.....	48
5.1 Análisis y desarrollo de la tecnología	48
5.2 Pruebas algoritmo de trilateración	49
6. CONCLUSIONES	60
6.1 Conclusiones.....	60
6.2 Trabajos futuros	60
Referencias.....	62

Lista de Figuras

<i>Figura 2.1 Localización, Técnica de Triangulación (WAHAB, 2022)</i>	8
<i>Figura 2.2 Localización Técnica Trilateración (Maya Velasco, 2019)</i>	9
<i>Figura 3.1 Modelo de sistema de colaboración Edge-cloud para Adp-FSELM</i>	17
<i>Figura 3.2 Diseño de sistema</i>	20
<i>Figura 3.3 Posicionamiento algoritmo de trilateración</i>	24
<i>Figura 4.1 Metodología de solución</i>	35
<i>Figura 4.2 Diagrama de flujo para la consulta de ubicación</i>	36
<i>Figura 4.3 Diagrama para determinar la ubicación</i>	37
<i>Figura 4.4 Arquitectura Ubico</i>	39
<i>Figura 4.5 Aplicación Móvil Ubico</i>	40
<i>Figura 4.6 CRUD Organización</i>	40
<i>Figura 4.7 Alta Organización</i>	40
<i>Figura 4.8 Registro Organización</i>	41
<i>Figura 4.9 Eliminar Organización</i>	41
<i>Figura 4.10 CRUD Departamentos</i>	41
<i>Figura 4.11 Alta Departamento</i>	41
<i>Figura 4.12 Registro Departamento</i>	42
<i>Figura 4.13 Eliminar Departamento</i>	42
<i>Figura 4.14 CRUD Beacons</i>	42
<i>Figura 4.15 Alta Beacons</i>	42
<i>Figura 4.16 Registro Beacons</i>	42
<i>Figura 4.17 Ubicación</i>	43
<i>Figura 4.18 Activar Bluetooth</i>	43
<i>Figura 4.19 Escaneo de beacons</i>	43
<i>Figura 4.20 Resultado de búsqueda</i>	43
<i>Figura 4.21 Pantalla Inicio Ubico</i>	44
<i>Figura 4.22 Bienvenida Ubico</i>	45
<i>Figura 4.23 Ubicación Actual del dispositivo</i>	45
<i>Figura 4.24 Iniciar búsqueda</i>	45
<i>Figura 4.25 Resultados de búsqueda</i>	45
<i>Figura 4.26 Servidor Node Js puerto 4000</i>	456
<i>Figura 4.27 Conexión de base de datos</i>	456
<i>Figura 5.1 Red de Beacons</i>	488
<i>Figura 5.2 Diagrama de flujo para determinar ubicación</i>	50

<i>Figura 5.3</i>	<i>Funcionamiento algoritmo Trilateración</i>	51
<i>Figura 5.4</i>	<i>Ejecución Aplicación</i>	52
<i>Figura 5.5</i>	<i>Resultado de búsqueda por trilateración</i>	53
<i>Figura 5.6</i>	<i>Resultado de búsqueda por Trilateración</i>	54
<i>Figura 5.7</i>	<i>resultado de búsqueda planta alta depto. Sistemas</i>	56
<i>Figura 5.8</i>	<i>Ubicación de beacons planta alta Depto. Computación</i>	56
<i>Figura 5.9</i>	<i>Ubicación de beacons planta alta Depto. Computación</i>	56
<i>Figura 5.10</i>	<i>Búsqueda de dispositivo 1</i>	56
<i>Figura 5.11</i>	<i>Búsqueda de dispositivo 2</i>	56
<i>Figura 5.12</i>	<i>Búsqueda de dispositivo 3</i>	56
<i>Figura 5.13</i>	<i>Ubicación de dispositivo Sala de juntas planta alta</i>	57
<i>Figura 5.14</i>	<i>Ubicación de dispositivo Escaleras planta alta</i>	57
<i>Figura 5.15</i>	<i>Ubicación de dispositivo Baños planta alta</i>	57
<i>Figura 5.16</i>	<i>Ubicación de dispositivo Pasillo planta alta</i>	57
<i>Figura 5.17</i>	<i>Ubicación de dispositivo Escaleras planta alta</i>	57
<i>Figura 5.18</i>	<i>Ubicación de dispositivo Pasillo planta alta</i>	57
<i>Figura 5.19</i>	<i>Ubicación de dispositivo no encontrado 1</i>	58
<i>Figura 5.20</i>	<i>Ubicación de dispositivo encontrado 2</i>	58

Listas de Tablas

<i>Tabla 2.1 Carga útil de un ibeacons (Moya Velasco, 2019)</i>	10
<i>Tabla 3.1 Resumen Tecnologías IPS</i>	14
<i>Tabla 3.2 Resumen de algoritmos en IPS</i>	15
<i>Tabla 3.3 Tabla comparativa trabajos relacionados</i>	31
<i>Tabla 5.1 Señal recibida de los beacons</i>	50
<i>Tabla 5.2 Localización de dispositivos por Trilateración Prueba 1</i>	52
<i>Tabla 5.3 Localización de dispositivos por Trilateración Prueba 2</i>	53
<i>Tabla 5.4 Resultados de las 9 ubicaciones Depto. Computación Planta baja</i>	54
<i>Tabla 5.5 Localización de dispositivos por Trilateración Prueba</i>	55
<i>Tabla 5.6 Resultados de las 9 ubicaciones Depto. Sistemas Planta alta</i>	55

Lista de Ecuaciones

<i>Ecuación 2.1 ToA</i> _____	6
<i>Ecuación 2.2 RtoF</i> _____	6
<i>Ecuación 4.1 Cálculo de la distancia D, a partir de la señal RSSI (1)</i> _____	37
<i>Ecuación 4.2 Localización a partir de la señal RSSI (2)</i> _____	37
<i>Ecuación 4.3 Localización a partir de la señal RSSI (3)</i> _____	38
<i>Ecuación 4.4 Localización a partir de la señal RSSI (4)</i> _____	38
<i>Ecuación 4.5 Localización a partir de la señal RSSI (5)</i> _____	38
<i>Ecuación 4.6 Localización a partir de la señal RSSI (6)</i> _____	38
<i>Ecuación 4.7 Localización a partir de la señal RSSI</i> _____	38
<i>Ecuación 4.8 Localización a partir de la señal RSSI</i> _____	38
<i>Ecuación 5.1 Propagación de señal en espacios cerrados</i> _____	49

Capítulo 1

Introducción

La localización en espacios cerrados es una técnica que permite ubicar personas u objetos dentro de un edificio o en un lugar cerrado. Con la utilización de la tecnología beacons (pequeños dispositivos de ultra bajo consumo) que constantemente emiten una información prefijada mediante BLE y con ayuda de los dispositivos móviles se puede lograr una ubicación precisa dentro de estos espacios cerrados. En estas circunstancias, el uso de GPS no es viable por su baja cobertura y precisión en espacios cerrados

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la tecnología ha evolucionado a gran velocidad dotando a las personas de dispositivos que proporcionan una mejor calidad de vida. Desde la industrialización y la globalización se ha hecho evidente la necesidad de desarrollar métodos, técnicas y herramientas que se adapten al uso oportuno de las nuevas tecnologías (Alcívar, 2022). Por lo tanto, la tecnología se ha convertido en una parte fundamental dentro de las actividades de toda persona, dando como resultado el diseño de herramientas que estén a la mano en todo momento y sobre todo fáciles de utilizar.

El sistema de posicionamiento global en exteriores basado en la posición por satélite (GPS) ha madurado lo suficiente como para proporcionar a los usuarios un posicionamiento de alta precisión. Sin embargo, las señales del GPS sólo pueden recibirse en el entorno exterior, en espacios cerrados son muy deficientes. Por lo tanto, existe una demanda urgente de tecnología de posicionamiento en espacios cerrados. El presente proyecto está orientado a la aplicación de nuevas tecnologías, implementando una solución para la ubicación de dispositivos en espacios cerrados, utilizando la tecnología *Bluetooth*.

Una de las áreas emergentes dentro del IoT, es el uso de *beacons*, pequeños dispositivos de ultra bajo consumo que constantemente emiten una información prefijada mediante BLE (*Bluetooth Low Energy*). El uso de BLE lo hace compatible con prácticamente todos los dispositivos móviles, lo que abre un abanico inmenso de posibilidades, ya que hoy en día los dispositivos inteligentes son una realidad al alcance de la mayoría (Tineo, 2016).

La presente investigación, se enfocó en el desarrollo de una solución que hemos llamado **ubico** sistema de localización *indoor* en tiempo real de bajo costo. Esta solución se basa en el uso de tecnología *Bluetooth* de Baja Energía (BLE), permitiendo localizar en el plano de un área en espacios cerrados dispositivos BLE emisores, gracias al despliegue de un número de dispositivos receptores llamados *beacons*. Tomando en cuenta el bajo costo de energía de los dispositivos BLE, unido a la posibilidad de estar activo por largos periodos de tiempo con una pila de botón, permite marcar una gran diferencia entre un *beacons* con independencia y un dispositivo que necesite la existencia de electricidad en el lugar donde será ubicado.

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad, El internet de las cosas ha permitido el desarrollo y crecimiento de los edificios inteligentes dotados de sistemas con cierto nivel de inteligencia como lo son sus sistemas contra incendios, iluminación, clima y navegación entre otros, haciendo que las actividades de los usuarios sean más placenteras y gratas.

Este gran salto a los edificios inteligentes, ha permitido a los administradores de sistemas obtener información precisa, útil y al momento, ayudando a la mejora continua en sus operaciones y sobre todo ofrecer mejores experiencias a los usuarios.

Hoy en día, es muy común ver a la mayoría de las personas hacer uso de estos edificios inteligentes y pasar gran parte del tiempo en ellos ya sea por trabajo, estudio, compras, visita o por estar en casa, y cada una de estas personas cuentan con un dispositivo móvil haciendo muy atractiva y desafiante la ubicación de personas en este tipo de espacios cerrados.

Es evidente que la localización en espacio abiertos se encuentra cubierta en gran parte por la tecnología del GPS. El problema lo encontramos al momento de querer ubicar a una persona u objeto en espacios cerrados donde el GPS no tiene buena funcionalidad, convirtiéndose en un gran reto la ubicación en este tipo de espacios cerrados. Derivado de la falta o nula precisión con la que cuenta la tecnología GPS en espacios cerrados y tomando en cuenta que el uso del teléfono móvil se ha convertido en parte fundamental de la vida cotidiana de las personas, surge la necesidad de saber la ubicación de personas en espacios cerrados con el fin de mejorar la calidad de experiencia durante su estancia.

1.2 Objetivo

El objetivo general de la presente tesis es desarrollar una aplicación que permita ubicar dispositivos móviles en espacios cerrados a través de la tecnología beacons.

1.2.1 Objetivos específicos

- Analizar e implementar un algoritmo de localización para la ubicación de dispositivos móviles en espacios cerrados.
- Desarrollar una aplicación que implemente el algoritmo de localización en espacios cerrados utilizando la tecnología beacons.
- Validar la aplicación llevando a cabo varios recorridos en espacios cerrados utilizando la tecnología beacons.

1.3 Organización de la tesis

A continuación, se enuncian los capítulos que conforman este documento tesis.

Capítulo 2 Marco teórico

En este capítulo, se elabora una revisión bibliográfica de los conceptos generales para abordar la temática de la ubicación en espacios cerrados.

Capítulo 3 Estado del arte

En este capítulo se realiza una revisión de aquellos trabajos que sirven como base para el desarrollo de la presente tesis, realizando una breve descripción de cada trabajo: a) Descripción general del trabajo, b) Objetivos, c) Métodos y técnicas y d) Conclusiones.

Capítulo 4 Metodología de solución

A lo largo de este capítulo determinaremos el método mediante el cual propondremos un modelo más adecuado para lograr obtener la ubicación de dispositivos móviles en espacios cerrados, asimismo se definirá el tipo de investigación a realizar. Finalmente, se establecerán nuestras necesidades de información y la manera en la que esta será recopilada y desarrollado el proyecto.

Capítulo 5 Implementación y pruebas

En este capítulo se muestra la implementación y las pruebas realizadas con el sistema móvil *Ubico*, las cuales validan este proyecto como resultado al problema definido en el capítulo 1.

Capítulo 6 Conclusiones

Para concluir este trabajo de tesis, este capítulo se dedicará a mostrar las conclusiones y recomendaciones obtenidas a lo largo del trabajo en este proyecto. Lo anterior será con el fin de que se le pueda dar continuidad al proyecto, así como mostrar los beneficios obtenidos.

Capítulo 7 Referencias

En este capítulo, mostramos la información que hace referencia a aquellos trabajos que sirvieron de base para la realización del presente trabajo de investigación.

Capítulo 2

Marco Teórico

El marco teórico que fundamenta esta investigación, proporcionará al lector una idea más clara para el entendimiento del desarrollo de esta investigación. Se describen los conceptos básicos de geolocalización, las principales técnicas reportadas en la literatura y la utilización de la tecnología *beacons* en combinación con alguna de estas técnicas.

2. MÁRCO TEÓRICO

A continuación, se presentan los conceptos mínimos para abordar la temática de los ambientes inteligentes y los conceptos de la tecnología BLE *Beacons*, divididos de la siguiente manera:

- Algoritmos para localización en espacios cerrados
- Técnicas usadas para localización en espacios cerrados
- Plataformas para su implementación

2.1 Algoritmos para localización en espacios cerrados

2.1.1 Algoritmo tiempo de llegada (ToA)

Como lo menciona (Cocom, 2019) el algoritmo tiempo de llegada se refiere al tiempo que le toma a una señal para llegar a un receptor desde un transmisor fijo, con el transmisor como punto de referencia. El algoritmo ToA Proporciona una alta precisión, pero a un costo mayor en complejidad de hardware.

Para este análisis se utiliza la ecuación 2.1, donde se analiza el tiempo de propagación de la onda para determinar la distancia (d_{ij}),

$$d_{ij} = (t_2 - t_1) * v$$

Ecuación 2.1 ToA

Sea t_1 el tiempo cuando el transmisor Tx_i envía un mensaje al receptor Rx_j , el cual lo recibe en el tiempo T_2 , donde $t_2 = t_1 + t_{p1}$, t_p *ttpp* es el tiempo que toma la señal para moverse de Tx a Rx y v es la velocidad de propagación, Para obtener los datos correctamente mediante esta técnica, se necesita sincronización entre los relojes del transmisor y receptor (Oliveira, 2021)

2.1.2 Algoritmo tiempo de ida y vuelta del vuelo (RtoF)

El algoritmo Tiempo de ida y vuelta se basa en la medida de tiempo entre el envío de paquetes de datos desde la estación al terminal móvil, y la recepción de la respuesta del móvil en la estación permitiendo la obtención de una distancia entre ambos, y la posible localización del dispositivo móvil de forma similar al TOA (Flores, 2019).

La implementación del algoritmo RtoF en espacios cerrados presenta algunos problemas que lo limitan, como el factor de análisis de la onda de retorno que es diferente al ToA, ya que debemos considerar dos viajes (ida y regreso) y el error en este doble análisis puede aumentar considerablemente (Oliveira, 2021).

Para obtener los valores del recorrido de la onda considerando la ida y el regreso, podemos usar la ecuación 2.2:

$$dist_{ij} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} * v$$

Ecuación 2.2 RtoF

Sea el tiempo t_1 el momento en el que el transmisor t_{xi} envía un mensaje al receptor R_{xi} el cual lo recibe en el tiempo t_2 , donde $t_2 = t_1 + t_p$. Posteriormente en el tiempo t_3 , R_{xi} transmite una señal de regreso a t_{xi} , el cual lo recibe en el tiempo t_4 y v es la velocidad de propagación (Oliveira, 2021).

2.1.3 Algoritmo ángulo de llegada (AoA)

El algoritmo de ángulo de llegada se basa en la medición de incidencia entre dos nodos que requieren un conjunto de antenas (Hou, 2018). El algoritmo AoA utiliza una señal del nodo transmisor, y el conjunto de antenas en el receptor calcula el ángulo de incidencia en función de la diferencia de fase en el coeficiente intelectual recibido por las antenas.

Las antenas receptor permiten analizar el seno del ángulo y obtener el tiempo de llegada de la señal consecuentemente a su distancia (De Oliveira Santos, 2021). Algo muy importante que presenta este algoritmo AoA es la consideración que en distancias cortas la precisión es excelente, pero conforme se aleja del punto del emisor presentan errores de lectura.

Otro factor a considerar en este algoritmo AoA es la necesidad de emplear hardware más complejo y una perfecta calibración del dispositivo, ya que un pequeño error en este proceso puede proporcionar un error considerable del punto a localizar (De Oliveira Santos, 2021).

2.1.4 Algoritmo indicador de intensidad de señal recibida (RSSI)

El algoritmo de indicador de intensidad de señal recibida (*Received Signal Strength Indicator*) es considerada una escala de referencia para medir el nivel de potencia de todas las señales recibidas por un dispositivo.

El algoritmo RSSI se basa en el cálculo de la potencia de señal recibida por un receptor que normalmente se expresa en decibelios milivatios (dBm) o milivatios (mW), se puede utilizar para medir la distancia entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx) dispositivos basados en las diferencias de potencia de la señal transmitida y recibida (Singh, 2021).

El algoritmo RSSI mide la atenuación de las señales transmitidas para calcular la intensidad en función de su reducción o pérdida debido a la propagación, por lo tanto, se puede estimar la distancia entre dispositivos móviles y además se puede adquirir información de su posición (Cocom, 2019).

2.2 Técnicas para localización en espacios cerrados

2.2.1 Técnica triangulación

La técnica de triangulación calcula una posición en función de la distancia predeterminada entre tres dispositivos de medición y los ángulos medidos desde esas tres ubicaciones de un objeto, puede ser dividida en Lateración y Angulación (Wahab, 2022). Si se logra tener, una buena cantidad de puntos de acceso, la precisión que se puede obtener con este algoritmo RSSI será muy buena, pero un pequeño error al momento del cálculo de ángulo es suficiente para afectar la precisión.

A partir de tres puntos de acceso, se realizó una medición del ángulo mediante las líneas de puntos distantes que se cruzan con la línea de base. Estos ángulos luego se utilizan para calcular distancias desconocidas y, como resultado, se encontró el lugar de la distancia (Wahab, 2022).

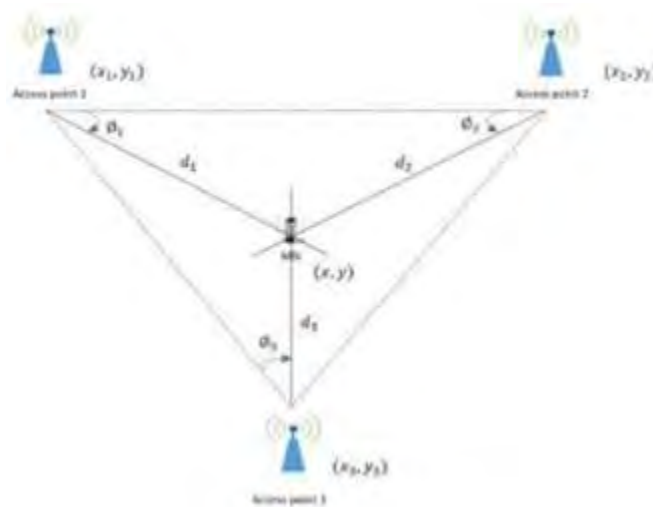


Figura 2.1 Localización, Técnica de Triangulación (WAHAB, 2022)

El algoritmo RSSI utiliza las propiedades geométricas de los triángulos para poder calcular la ubicación de los objetos (Xhafa, 2019). Cuando la medición del algoritmo AoA se encuentra disponible, el algoritmo de triangulación puede ser utilizado para estimar la ubicación del nodo objetivo utilizando leyes trigonométricas (Bibbò, 2022) (Cocom, 2019).

2.2.2 Técnica de trilateración

La técnica de trilateración también llamada medición de rango calcula la posición de un objeto midiendo su distancia desde múltiples posiciones de referencia (Bibbò, 2022). Es una técnica que permite determinar la posición de un objeto gracias a la utilización de mediciones de rango simultáneas, al menos hace uso de tres nodos de referencia de ubicaciones conocidas (Wahab, 2022) (Moya Velasco, 2019).

De igual manera que la técnica de triangulación, La técnica de trilateración hace uso de las propiedades geométricas de los triángulos para poder estimar la posición de un objeto (Cocom, 2019).

- Tres posiciones conocidas (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3)
- Punto desconocido conocido (x_0, y_0) a tres puntos de distancia d_1 , d_2 , d_3

La técnica de trilateración basa su funcionamiento en un mínimo de tres anclas y sus respectivas posiciones aproximando la ubicación de un dispositivo móvil, esto se consigue trazando una circunferencia con radio (Distancia medida) y centro en cada ancla. La región determinada por la intersección de las circunferencias determina la posición estimada del dispositivo. Cuantas más anclas tengamos, más precisión tendremos.

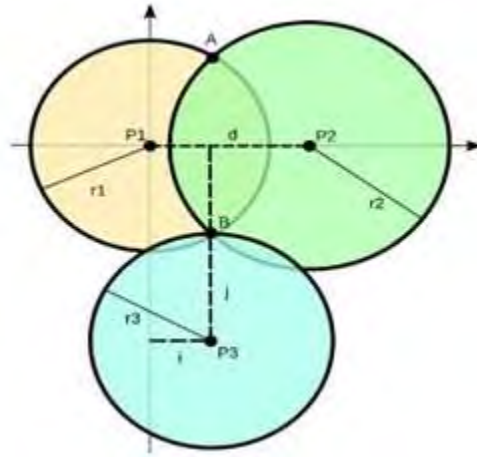


Figura 2.2 Localización Técnica Trilateración (Maya Velasco, 2019)

2.2.3 Técnica de proximidad

La técnica de proximidad es un tipo de localización sin rango, convirtiéndose en el método más simple para ser utilizado cuando el usuario no conoce la configuración del radio específica de los dispositivos móviles o la arquitectura del entorno (Wahab, 2022). Esta técnica se apoya en los límites de cobertura de los sistemas de radiofrecuencia, infrarrojo y ultrasonido (Furquez, 2021)

La técnica de proximidad ofrece una precisión en espacios cerrados menor a un metro entrando en función al momento que un dispositivo móvil detecta movilidad, utilizando las antenas más cercanas para calcular la posición. Si un dispositivo móvil detecta más de una antena la ubicación se calcula utilizando la señal más fuerte. Para calcular la distancia de acceso entre dispositivos móviles y determinar la ubicación móvil se utiliza el algoritmo RSSI (Wahab, 2022) (Hayward, 2022).

2.2.4 Fingerprinting

La técnica *fingerprinting* es una de las técnicas más utilizadas para la ubicación con un gran potencial para reducir las dificultades de propagación multirayecto (Wahab, 2022), esta técnica también es conocida como mapeo de radio (Hayward, 2022). La técnica *fingerprinting* es una de las más sugeridas cuando de posicionamiento en espacios cerrados se habla, no necesita de una infraestructura especial o adicional ya que los puntos de acceso WiFi normalmente se encuentran instalados para servir internet, y los valores de intensidad recibida RSS son de fácil acceso desde la interfaz de propagación de API's de los dispositivos móviles (Wahab, 2022).

En esta técnica de *fingerprinting* se recolectan y almacenan primero las características de las señales de RF para varios ángulos en diferentes posiciones en el entorno y se comparan con las actuales para estimar la posición (García-Bautista, 2022) (Furquez, 2021).

En (Moya Velasco, 2019) se menciona que la técnica *Fingerprints* se ejecuta en dos etapas:

Fase de entrenamiento (fase off-line); donde se mapea el área de interés ligando una posición a un patrón de potencias, formando así la base de datos y generando un mapa del área de prueba.

Fase de pruebas (fase on-line), donde se obtienen mediciones en tiempo real de los parámetros de potencia, las cuales se comparan con la base de datos existente para estimar la ubicación del dispositivo móvil asociándola con la posición almacenada que presente mayor coincidencia.

2.3 Plataformas para implementación

2.3.1 *Bluetooth* (BLE)

Bluetooth de baja energía, es un tipo de comunicación inalámbrica optimizada para comunicaciones de corto alcance y emplean fuentes de señal de RF para monitorear el paradero de los usuarios a través de sensores de proximidad o huellas dactilares RSSI (Wahab, 2022). El costo para su implementación es realmente bajo, ya que es uno de los más populares y fáciles de usar en el posicionamiento en espacios cerrados, pero el consumo de energía puede ser elevado derivado del alto rendimiento de datos.

La tecnología *bluetooth* se basa en el estándar IEEE 802.15.1 operando sobre la banda SM (*Industrial Scientific and Medical*; 2.4 GHz) con un alcance de rango entre 10 y 15 metros. Además, también permite la transmisión de voz y datos brindando conectividad a redes personales, con un ancho de banda de 79 MHz y una velocidad de transmisión de 54 Mbps (Moya Velasco, 2019).

Los métodos de Trilateración y triangulación trabajan muy bien con esta técnica BLE.

2.3.2 WiFi para espacios cerrados

La plataforma WiFi se basa en el estándar IEEE 802.11 cuenta con un alcance medio entre los 50 y 100 metros operado entre las bandas de frecuencia de 2.4 Ghz y 5 Ghz, es muy conocido y se usa ampliamente en la tecnología de radio (Moya Velasco, 2019). Los sistemas de navegación en espacios cerrados basados en Wi-Fi suelen utilizar técnicas de *Fingerprint* RSS, triangulación o trilateración para la estimación de la ubicación (Wahab, 2022).

WiFi para localización, basa sus mediciones en el nivel de potencia de cada señal, normalmente para este proceso utiliza un identificador RSSI, donde el móvil, mide la potencia de los diferentes puntos de acceso distribuidos en la infraestructura.

En la revisión realizada de las tecnologías de posicionamiento en espacios cerrados en (Zafari, 2019), reveló que Wi-Fi es un reemplazo prometedor para las señales GPS, debido a que se centran en la toma de huellas dactilares Wi-Fi, que tiene una alta aplicabilidad en espacios cerrados complejos porque no requiere línea de vista (LoS) desde un AP.

La plataforma WiFi es fácil de implementar, desplegarse, fácil de crecer y es de bajo costo, su desventaja se puede ver por los factores ambientales, personas, muros e inmobiliario que se encuentren dentro del espacio de medición.

2.3.3 Beacons

Las *Beacons* son pequeños dispositivos para BLE que se montan en las paredes de manera muy discreta. El dispositivo *beacons* utiliza la fuente de alimentación de la batería, en cuanto a eso, requiere la colocación de la batería (Wahab, 2022) (Moya Velasco, 2019). Los beacons presentan un protocolo desarrollado por Apple y presentado en el año 2013; por defecto tiene soporte de forma nativa en el sistema operativo iOS. Sin embargo, funciona de manera adecuada en otros sistemas

operativos como Android. En la siguiente tabla 2.1, se muestra los campos descriptivos de los *beacons* (Moya Velasco, 2019).

Tabla 2.1 Carga útil de un *ibeacons* (Moya Velasco, 2019)

Campo	Bytes	Descripción
Prefijo iBeacons	9	Preámbulo de valor fijo que contiene información sobre el fabricante y el protocolo.
UUID	16	Identificador global del dispositivo. Definido por el desarrollador de cada aplicación. Ejemplo de un UUID de proximidad: D9B9EC1F-3925-43D0-80A9-1E39D4CEA95C
Major	2	Identificador de la zona o red local de <i>Beacons</i> . Definido por el desarrollador de cada aplicación.
Minor	2	Identificador del dispositivo dentro de la zona o red local de <i>Beacons</i> . Definido por el desarrollador de cada aplicación.
Tx Power	2	Indicador de potencia de la señal. RSSI

Capítulo 3

Estado del arte

En este capítulo se presenta una revisión de aquellos trabajos que sirven como base para el desarrollo del problema a resolver **Sistema de localización de dispositivos móviles en espacios cerrados utilizando la tecnología de *beacons***. Este capítulo se divide en dos partes: una revisión de los trabajos relacionados con la localización en espacios cerrados utilizando *beacons* y posteriormente una revisión de diversas técnicas que puedan ayudar a la localización en espacios cerrados.

3. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se detallan aquellos trabajos que sirvieron como base para el desarrollo de la presente tesis.

3.1 Aspectos descriptivos de los trabajos del estado del arte en geolocalización en espacios cerrados

Los aspectos descriptivos utilizados para detallar la información referente a la localización en espacios cerrados son:

- **Descripción general del trabajo.**
Es una breve descripción del trabajo, es el primer contacto que tiene el lector con el texto para darse una idea general de lo que trata.
- **Objetivo.**
Se describe lo que se pretende realizar en el proyecto.
- **Métodos y técnicas.**
Los trabajos que se encuentran en esta sección sirven para conocer las técnicas y/o métodos que utilizan para lograr una localización de dispositivos en espacios cerrados.
- **Conclusiones.**
Se refiere a mencionar las conclusiones a las que llegó el autor al finalizar su trabajo de investigación

3.2 Una revisión de los sistemas de posicionamiento en interiores

Descripción del trabajo

Este trabajo de investigación (Wahab, 2022) presenta un artículo de revisión sobre tecnologías, algoritmos y técnicas de posicionamiento en espacios cerrados, que permite proporcionar a los usuarios una comprensión completa de las tecnologías de posicionamiento, los algoritmos y las técnicas involucradas en un entorno interior.

Objetivo

Se espera que este documento de revisión brinde una mejor comprensión al lector y compare las mejores soluciones para IPS al elegir las tecnologías, los algoritmos y las técnicas adecuadas que deben implementarse de acuerdo con su situación

Métodos y técnicas

Es importante utilizar la tecnología correcta en función del tipo de posicionamiento que se desee desarrollar. Basado en satélite, magnético, sensor inercial, sonido (sonido audible, sonido ultrasónico, sonido acústico), óptico, radiofrecuencia (Wi-Fi, BLE, RFID y UWB) y visión artificial.

La base magnética es adecuada para determinar la precisión de la posición; sin embargo, es complejo y de alto costo. Además, el sistema de navegación inercial también se puede utilizar para determinar la alta precisión y se puede desarrollar en una amplia gama de aplicaciones. Sin embargo, fusionado con base magnética para obtener una estabilización a largo plazo, hace que el sistema sea complejo. Debido al alto costo y su complejidad, las técnicas basadas en sonido son las

menos adecuados para los sistemas de posicionamiento en espacios cerrados. Los sistemas de base óptica y visual son de bajo costo; no obstante, son complejos y menos precisos en comparación con otras tecnologías.

Tabla 3.1 Resumen Tecnologías IPS

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Basado en satélite	<ul style="list-style-type: none"> • GPS fácil de navegar • Implementación de bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> • No se puede implementar en un entorno interior • Menos precisa
De base magnética	<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión 	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de alto costo • Complejo
Basado en inerciales	<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión • Amplia gama de aplicaciones • No requiere instalación de HW 	<ul style="list-style-type: none"> • Fusionado con magnético para obtener una estabilización a largo plazo • Complejo
Basado en Sonido		
Sonido Audible	<ul style="list-style-type: none"> • Menos costoso • Fácil de implementar 	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de alto costo
Ultrasónico	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de distancia de corto alcance 	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de alto costo
Sonido acústico	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de bajo costo • Fácil de implementar 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejo
De base óptica	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejo • Baja precisión
Basado en radiofrecuencia (RF)		
Wifi	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto consumo de energía
BLE	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo consumo de energía • Alta precisión 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejo • Implementación de alto costo
Rfid	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño pequeño • Alta precisión • Bajo consumo de energía 	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de alto costo • Complejo
UWB	<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión • Bajo consumo de energía 	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de alto costo

Se puede concluir que el GPS no es adecuado para usar en un entorno interior.

La señal basada en radiofrecuencia, es fundamental para determinar la posición ya que se utiliza en el cálculo y la estimación de una ubicación. Los algoritmos comúnmente involucrados son:

- AoA (Ángulo de Llegada) es utilizada en una técnica simplificada para operaciones en 2D, calculando ángulos en un solo plano. La localización con este algoritmo se determina mediante el uso de antenas direccionales o conjuntos de antenas. Y para determinar la ubicación del nodo móvil, se requieren al menos dos nodos de referencia.
- ToA (Tiempo de Llegada) es el tiempo absoluto en que una señal de radio de un transmisor llega a un receptor distante se conoce como el tiempo de llegada. Este algoritmo se basa en

determinar el momento en que se envió la señal al objetivo, el momento en que la señal llega al objetivo y la velocidad a la que viaja la señal.

- TDoA (Diferencia horaria de llegada) es un enfoque común para identificar objetivos utilizando un conjunto de nodos sensores con posiciones conocidas. Es la segunda técnica de rango más utilizada. La señal de tiempo que se recibió y la velocidad a la que viajó es todo lo que se requiere para esta técnica.
- RSSI (Indicador de intensidad de la señal recibida) es una medida de la intensidad de una señal de radio que se ha recibido. El enfoque tradicional de la localización basada en RSS consiste en utilizar datos RSS para obtener información sobre la distancia entre el sensor y el objetivo.

Como se muestra en la siguiente tabla 3.2, debido a la complejidad, el alto costo y el hardware adicional requerido para AoA, ToA y TDoA en comparación con RSSI, el algoritmo RSSI es la mejor solución para determinar la posición del usuario/objeto.

Tabla 3.2 Resumen de algoritmos en IPS

Algoritmos	Ventajas	Desventajas
AoA	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de implementar • Requiere al menos dos AP para la localización 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja precisión en un área grande • Antena especializada • Implementación de alto costo • Complejo
ADoA	<ul style="list-style-type: none"> • No hay necesidad de una fase de ángulo 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor adicional requerido
PoA	<ul style="list-style-type: none"> • El cambio de señal es fácil de obtener 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere LoS para alta precisión
PDoA	<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión • Reducción de los efectos de trayectos múltiples 	<ul style="list-style-type: none"> • La precisión depende del efecto de trayectos múltiples
RSRP	<ul style="list-style-type: none"> • Proporcionar más fuerza de señal 	<ul style="list-style-type: none"> • La interferencia de la estación y el ruido térmico tienen influencia
RSSI	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de bajo costo • Fácil de implementar 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja precisión en un área grande
CSI	<ul style="list-style-type: none"> • Buena estabilidad • Alta precisión 	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de alto costo • Complejo
ToA	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de implementar • Medición de tiempo requerida para TDMA/ Red CDMA 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita una red sincronizada • Alto costo de implementación • Complejo
TDoA	<ul style="list-style-type: none"> • El receptor no necesita el tiempo de transmisión • Medición de tiempo requerida para TDMA/ Red CDMA 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita una red sincronizada • Complejo
RTT	<ul style="list-style-type: none"> • Alto rango de medición • No es necesario sincronizar entre nodos 	<ul style="list-style-type: none"> • Efectos multitrayecto • Complejo

Conclusiones

Se presenta una descripción general del sistema de posicionamiento global y el sistema de posicionamiento en espacios cerrados. Esta revisión tiene como objetivo proporcionar una comprensión completa de las tecnologías de posicionamiento en espacios cerrados, los algoritmos y las técnicas involucradas en un entorno interior. Las tecnologías de comunicación de RF como Wi-Fi, BLE, RFID y UWB se utilizan ampliamente en el posicionamiento en espacios cerrados recientemente para desarrollar la estimación de ubicación. El algoritmo RSSI es el mejor algoritmo para determinar la estimación de la ubicación del usuario en comparación con AoA, ToA y TDOA, que requieren hardware adicional, alto costo y son complejos. Se sugiere la técnica de trilateración debido a su bajo costo, facilidad de implementación y alta precisión.

3.3 Un esquema de localización interior diferencialmente privado con fusión de *fingerprints* WiFi y *bluetooth* en la computación de borde.

Descripción del trabajo

En este trabajo de investigación (Zhang, 2022) se utiliza la técnica de localización en espacios cerrados *fingerprints* basada en los niveles de potencia que recibe un dispositivo móvil de los diferentes nodos de acceso WIFI, y los niveles de potencia de puntos conocidos como huellas (donde ya es conocida su posición), resultando de gran importancia contar con estos valores precisos de potencia (las huellas) para tener una localización más precisa. Descrito lo anterior, se presenta una máquina de aprendizaje extremo semisupervisada de fusión de *fingerprints* diferencialmente privada para la localización en espacios cerrados en la informática perimetral, llamada Adp-FSELM. emplea en primer lugar un marco de sistema de preservación de la privacidad basado en una red perimetral de varios niveles para cumplir con los requisitos de la localización de *fingerprints* en espacios cerrados basada en ML para una respuesta ligera, de baja latencia y en tiempo real. Luego, el Adp-FSELM extiende la privacidad diferencial electrónica a la máquina de aprendizaje extremo semisupervisada de fusión de *fingerprints* para la localización en espacios cerrados en computación perimetral a través de un proceso privado de tres fases que consiste en ofuscación de muestras etiquetadas privadas, fusión de características privadas diferenciales y privacidad diferencial.

Objetivo

Preservar la privacidad del posicionamiento interior, de fusión de múltiples *fingerprints* basado en ML en escenarios informáticos periféricos.

Métodos y técnicas

Primero presenta el modelo del sistema y el modelo de amenazas a la privacidad. Luego, propone el algoritmo Adp-FSELM, que es un algoritmo de localización en interiores diferencialmente privado con fusión de *fingerprints*, WiFi y BLE en el sistema de colaboración *edge-cloud*. Finalmente, brinda un análisis de privacidad concreto y una descripción de los parámetros de privacidad.

Modelo del sistema

La arquitectura presentada para este modelo, divide las fases de operación de Adp-FSELM en dispositivos perimetrales, nodos perimetrales, servidores perimetrales y servidor en la nube. Suponiendo que todos los usuarios contribuyan voluntariamente con el *fingerprints* y el RSSI

recopilado para entrenar el modelo de localización en interior de fusión de *fingerprints* basado en ML que se aloja en el servidor de la nube, a fin de disfrutar del ILS deseado.

Modelo de amenazas

Los dispositivos edge, son responsables de recopilar y almacenar diversos datos RSSI, y los nodos edge se utilizan para agregar estos diversos datos RSSI de diferentes dispositivos perimetrales, y también proporcionan RSSI agregado diversificado para servidores perimetrales. Los servidores perimetrales se emplean para realizar la operación de fusión de las señales WiFi y BLE, y el servidor en la nube brinda un soporte poderoso para el entrenamiento del modelo de posicionamiento en espacios cerrados.

Algoritmo Adp-FSELM

el algoritmo Adp-FSELM consta de cuatro fases de operación: ofuscación de muestras etiquetadas, agregación de características de muestras, fusión de características privadas diferenciales y entrenamiento de modelos privados diferenciales.

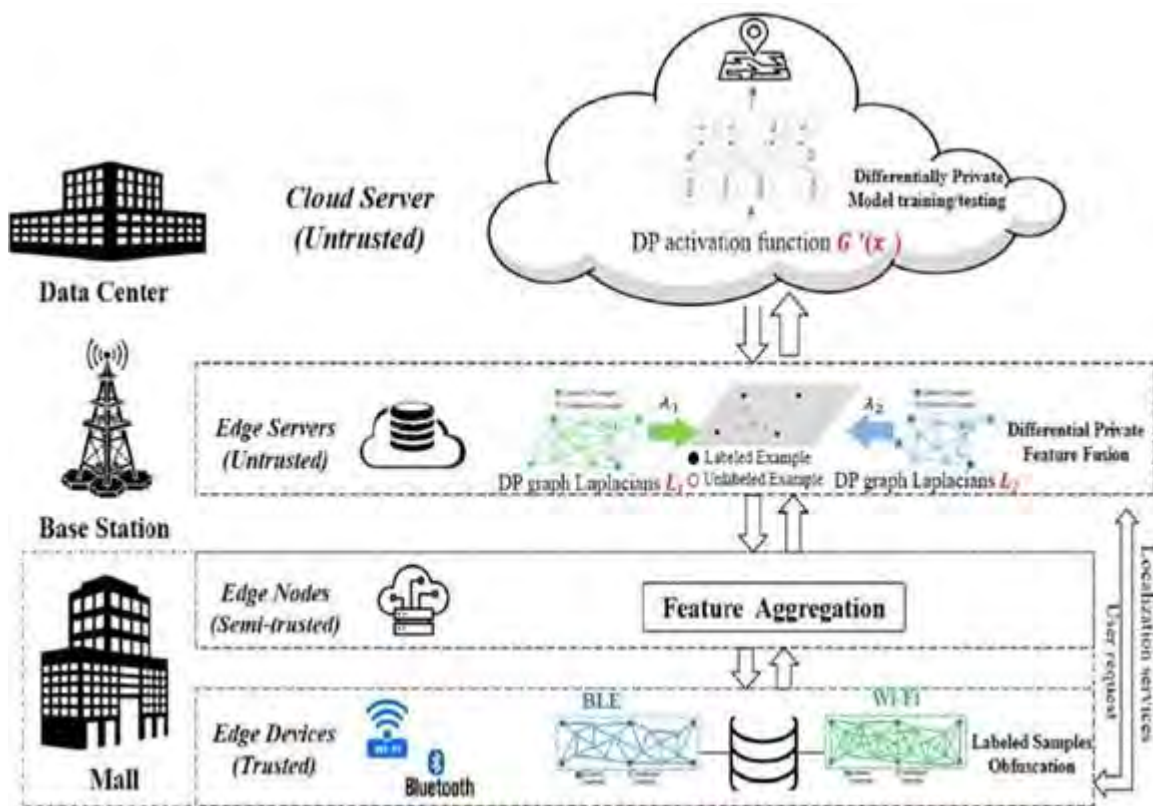


Figura 3.1 Modelo de sistema de colaboración Edge-cloud para Adp-FSELM

Conclusiones

En este trabajo de investigación propusieron un algoritmo de máquina de aprendizaje extremo semisupervisado de fusión de huellas dactilares privada diferencialmente en el marco de computación de borde, llamado Adp-FSELM. El Adp FSELM emplea una colaboración edge.-cloud de

varios niveles de red, para satisfacer las necesidades de posicionamiento de *fingerprints* basado en ML para una respuesta ligera, de baja latencia, en tiempo real y protección de la privacidad.

Al mismo tiempo, agregaron el ruido laplaciano apropiado en cada fase de operación de Adp FSELM mediante el uso de tecnología DP. Además, garantizaron la privacidad de diferentes números de muestras etiquetadas para el aprendizaje semisupervisado sin sacrificar mucho la precisión de la ubicación.

Por último, llevaron a cabo extensos experimentos en conjuntos de datos prácticos y compararon el esquema presentado con cinco métodos de aprendizaje semisupervisados sobre precisión de ubicación y seis métodos de localización maduros sobre consumo de tiempo. Los resultados demuestran que Adp FSELM podría lograr un alto nivel de preservación de la privacidad y una precisión de ubicación aceptable con un bajo consumo de tiempo.

3.4 Localización en espacios cerrados mediante *Bluetooth* de baja energía para grandes zonas industriales e infraestructuras limitadas

Descripción del trabajo

En este trabajo de investigación (Szyk, 2023) se presentan tres algoritmos de localización que requieren una infraestructura limitada, tienen baja complejidad y pueden proporcionar información de ubicación valiosa a bajo costo. Los algoritmos propuestos se verificaron en una aplicación de agricultura inteligente de la vida real en la que se utiliza BLE para controlar el bienestar de los animales de granja.

La estimación de la ubicación se basa en una intensidad de señal relativa medida por varios anclajes y las propiedades geométricas del área y el despliegue del anclaje. Además, los métodos propuestos utilizan únicamente medidas RSSI y métricas que pueden derivarse de ellas.

Objetivo

Ubicar a los animales de una granja en un galpón de $1600m^2$ donde la información de ubicación es de gran importancia, porque, las granjas contemporáneas tienen áreas separadas para que los animales se ordeñen, alimenten y beban. El tiempo que los animales pasan en diferentes áreas depende de su condición, por lo tanto, monitorear la ubicación a lo largo del tiempo es un indicador importante del estado y bienestar.

Métodos y técnicas

Este trabajo de investigación propone tres algoritmos que determinan la ubicación del dispositivo en función de los valores relativos de RSSI medidos por beacons cercanos con posiciones conocidas.

- **Algoritmo de anillo**

El algoritmo de anillo intenta localizar el dispositivo en función del rango estimado de distancias desde los anclajes. Está motivado por la observación de poder informar los valores promedio de RSSI similares para diferentes distancias. Además, para algunos valores de RSSI, el rango de distancias posibles al ancla es significativamente diferente.

De tal manera, que, el mismo valor de RSSI se puede medir para diferentes distancias desde el ancla. De manera similar, para una sola distancia, se pueden medir varios valores de RSSI.

Esto significa que la estimación de una sola distancia basada en la medición RSSI no puede ser precisa. Por lo tanto, el algoritmo de anillo determina el rango de distancias para la medición de RSSI.

- **Algoritmo seccional**

El algoritmo seccional toma la definición de la sección como entrada y clasifica cada una con una puntuación. Las puntuaciones se calculan como el valor medio de la raíz cuadrada del TSS medido por los anclajes. La raíz cuadrada es una técnica estadística estándar para equilibrar las mediciones y minimizar el sesgo hacia las anclas más fuertes. Solo se consideran algunos anclajes para el cálculo, en base a la distancia máxima aceptable desde el perímetro de la sección hasta el anclaje (max).

Además de la ubicación estimada del dispositivo, el algoritmo permite evaluar la certeza del resultado a través del análisis del mapa de probabilidad. Esto puede ayudar a los usuarios a evaluar la credibilidad de la ubicación y evaluar rápidamente la eficiencia del sistema.

- **Algoritmo de masa**

El algoritmo de masa se basa en un método para determinar el centro de masa, utilizado originalmente en mecánica a veces denominado punto de equilibrio, las masas se definen como la raíz cuadrada de TSS. Conocer las posiciones de los anclajes y asignarles masas permite calcular el centro de masa. En comparación con los enfoques clásicos basados en la multilateración, este método, utiliza dependencias entre las señales recibidas, por lo que no es necesario transformar RSSI (o TSS) en distancia.

Conclusiones

En este trabajo de investigación se demuestra que los algoritmos propuestos pueden proporcionar información de localización útil utilizando la infraestructura existente y con costos adicionales mínimos. En comparación con los enfoques basados en el modelo de pérdida de ruta de distancia logarítmica y la multilateración, los métodos propuestos mejoran la precisión de localización de la sección y el posicionamiento XY. El mejor método de posicionamiento (Anillo B) reduce el error euclidiano medio hasta en 3,25 m (29,1 %) y el mejor método de localización (Seccional) reduce el error *Chebyshev* medio en un 29 %. A pesar de que los algoritmos propuestos mejoran la precisión de la localización, su aplicación es relativamente sencilla.

En consecuencia, los métodos propuestos son adecuados para escenarios en los que los objetos están estacionarios o se mueven lentamente. Están diseñados para áreas donde el número y la densidad de anclajes es bajo, la frecuencia de medición de RSSI es baja y los métodos típicos de localización basados en el rango fallan.

3.5 Una aplicación IoT de bajo consumo que utiliza beacons para la localización en espacios cerrados

Descripción del trabajo

En este trabajo de investigación (Pascale, 2021) utilizan un sistema que consta de tres dispositivos maestros para obtener los valores RSSI relacionados con el único dispositivo esclavo que se va a ubicar y convertir estos valores en distancia. Cada maestro, posicionado en puntos conocidos a priori, obtiene y procesa los valores RSSI convirtiendo el valor de potencia de la señal en distancia. El procesamiento se realiza a través de un microprocesador que recibe como entrada valores RSS,

devolviendo como salida el valor de la distancia entre el nodo móvil y el nodo fijo cuya posición en el espacio se conoce. Posteriormente mediante la técnica de trilateración se obtienen las coordenadas (x, y).

Objetivo

Investigar los métodos, tecnologías y aplicaciones más comunes para la localización en espacios cerrados en IoT y analizar los principales sistemas actualmente en uso y la aplicación de estas soluciones a las condiciones reales. Proponiendo un método innovador para detectar el flujo de personas en una ubicación interior. Basado en la tecnología *Bluetooth* de baja energía (BLE).

Métodos y técnicas

El usuario tendrá que usar un dispositivo portátil, que el maestro pueda detectar a través de los módulos de conectividad *Bluetooth*. Cada dispositivo de referencia deberá recibir valores RSS de el dispositivo portátil, convertirlos en distancia y almacenarlos en un archivo de texto. El sistema, prevé un número determinado de nodos de referencia situados en puntos conocidos a priori y un nodo móvil.

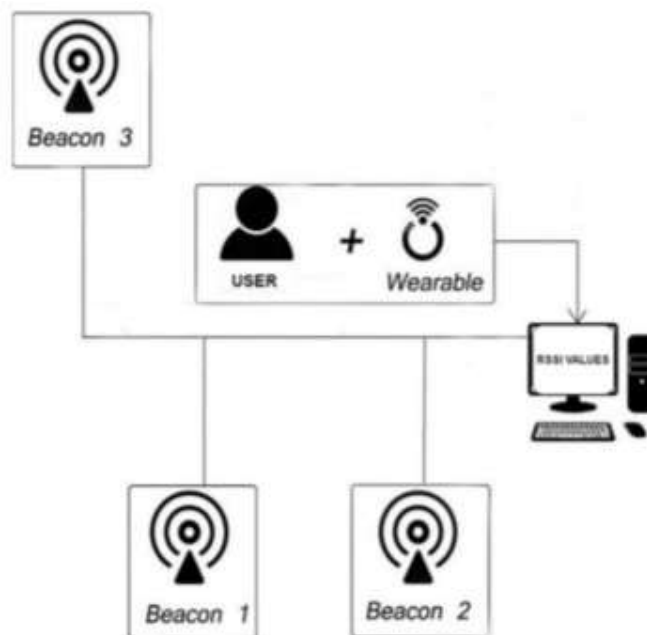


Figura 3.2 Diseño de sistema

El sistema del móvil corresponde al dispositivo a ubicar, es decir, un módulo *Bluetooth* HC-05 alimentado por batería. El sistema fijo está compuesto por los tres módulos *Bluetooth* de referencia, cada uno gestionado por un *Arduino Pro Mini* (controladores inteligentes) y por la computadora, que lee los datos vía serial y los almacena en una base de datos. Posteriormente, a través de un programa (Matlab o Excel), el usuario experto puede visualizar gráficamente los resultados obtenidos

Por lo tanto, para identificar un objeto, es necesario tener al menos tres objetos maestros que identifiquen el espacio en el que se encuentra el objetivo. Para ello se utilizó la técnica de

trilateración. En un plano bidimensional, se deben utilizar al menos tres sensores y colocarlos en el plano para garantizar que la medición sea única. En estas condiciones, la técnica se puede definir como trilateración hiperbólica. Esta técnica garantiza que podemos encontrar una posición de destino utilizando la señal de RSSI.

Conclusiones

En este trabajo de investigación se propone un enfoque para desarrollar un sistema capaz de localizar un objeto en espacios cerrados utilizando un sistema basado únicamente en módulos *Bluetooth*, donde es necesario utilizar un enfoque basado en zonas. La ventaja de este sistema radica en que este tipo de enfoque admite un rango de valores de RSSI para cada zona y, por lo tanto, es intuitivo entender qué tipo de movimiento se realiza. Estos enfoques son susceptibles de mejoras. Además de ser utilizado para el posicionamiento interno simple, se puede aplicar, posteriormente, para crear un sistema más complejo, completo y preciso, utilizando Wi-Fi y UWB.

3.6 Modelización del comportamiento de un sistema de localización en espacios cerrados basado en beacons

Descripción del trabajo

En este trabajo de investigación (Bilbao-Jayo, 2021) el problema del posicionamiento en espacios cerrados se aborda considerando el rendimiento obtenido al usar dos tipos diferentes de dispositivos para estimar la posición en espacios cerrados: un teléfono inteligente y un reloj inteligente. Con ambos dispositivos, se aprovechó la tecnología *Bluetooth Low Energy* (BLE) para obtener información de posicionamiento en espacios cerrados.

Se equipó una vivienda genérica con infraestructura de *beacons* BLE, realizaron varias pruebas con diferentes configuraciones en cuanto al número y modelos de *beacons* en cada estancia. Para cada campaña de prueba, se calculó el rendimiento en términos de porcentaje de error medio en la detección de la posición interior utilizando un teléfono inteligente y un reloj inteligente. Finalmente se discutieron los resultados.

Para la predicción de ubicación, los autores presentaron un algoritmo basado en el uso de incrustaciones neuronales, para representar las ubicaciones de una casa y un mecanismo basado en la atención que, en lugar de aplicarse a los estados ocultos de la arquitectura de la red neuronal, se usa para modificar esas incrustaciones.

Objetivo

La predicción y el modelado del comportamiento del usuario es un problema central que debe resolverse en la creación de espacios más eficientes y sostenibles desde el punto de vista energético.

Métodos y técnicas

El ambiente interior de la vivienda está equipado con una infraestructura de *beacons* BLE. En particular, se coloca una *beacons* BLE en cada habitación. En el lado del servidor cada asociación entre una *beacons* (es decir, la dirección MAC de la *beacons*) y su ubicación (es decir, la habitación en la que se encuentra) se almacena en la base de datos.

El dispositivo de monitoreo consiste en un teléfono inteligente o reloj inteligente que ejecuta una aplicación especialmente diseñada e implementada. En particular, la aplicación móvil realiza escaneos repetidos de *Bluetooth* en intervalos de tiempo configurables.

El algoritmo basado en el uso de incrustaciones neuronales que presentan en este trabajo de investigación modela los movimientos del usuario a través de espacios cerrados; utiliza la ubicación semántica para modelarlos. Una de las características de este algoritmo es que funciona en el espacio de ubicación semántica en lugar del espacio del sensor, lo que nos permite abstraernos de la ubicación interior subyacente.

Conclusiones

En este trabajo de investigación se presentó un sistema de localización en espacios cerrados basado en BLE, su evaluación utilizando un teléfono inteligente y un reloj inteligente como dispositivos de monitoreo. Sobre ese sistema, construyeron un sistema de predicción de comportamiento basado en ubicaciones y validando dos enfoques diferentes. Se evaluó y analizó el rendimiento del sistema en términos de porcentaje de error medio.

Se consideró una infraestructura de *beacons* BLE distinta para cada prueba alterando la cantidad y los modelos de *beacons* BLE en cada habitación del entorno interior considerado.

Los mejores resultados fueron alcanzados usando el reloj inteligente en lugar del teléfono inteligente. Además, se introdujo un sistema de predicción de posición basado en incrustaciones neuronales para representar las ubicaciones de una casa, junto con un mecanismo basado en la atención que modifica esas incrustaciones en lugar de aplicarlas a los estados ocultos del diseño de la red neuronal.

3.7 Localización de peatones en espacios cerrados basada en información de contacto mediante *beacons Bluetooth* de baja energía

Descripción del trabajo

En este trabajo de investigación (Shiraki, 2022) consideraron la estimación de la posición de los peatones en un área interior bidimensional, el cual debe llevar un teléfono inteligente que pueda transmitir y recibir señales BLE. Además, se colocan varias *beacons* BLE (es decir, nodos de anclaje) en posiciones conocidas. Cada nodo envía periódicamente una señal inalámbrica que contiene una lista de identificadores y valores RSSI de todos los nodos. Luego, el servidor reconoce todos los identificadores de nodos en el área de observación y la relación de proximidad. Si el valor de RSSI alcanza o supera un umbral, el servidor reconoce la relación de proximidad entre los nodos enumerados por el remitente.

Objetivo

El presente trabajo de investigación propone dos métodos de localización de peatones en espacios cerrados basados en información de contacto utilizando *beacons bluetooth* de baja energía (BLE), a saber, multilateración y localización cooperativa. El objetivo de este estudio, es demostrar la efectividad de los métodos propuestos utilizando solo la información de contacto.

Métodos y técnicas

Primeramente, realizan la estimación de la distancia entre nodos basada en la relación de proximidad. Se calcula la distancia media por salto y la distancia entre nodos a partir de la relación de proximidad.

$$d_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k \in N} |a_i - a_j|$$

Posteriormente, calculan la distancia entre los nodos

$$d_{ij} = d_{avg}^{hij}$$

El método propuesto 1, emplea la multilateración basada en la distancia entre un peatón y tres o más nodos de anclaje. A continuación, las coordenadas estimadas del peatón i (\hat{x}) están representadas por r_i , que se expresa de la siguiente manera.

$$r_i = \arg \min_{x} \sum_{j \in N} (|x - a_j| - d_{ij})^2$$

$$A_i = \{j \in N; (i, j) \in P\}$$

La ecuación anterior es utilizada para encontrar una posición estimada que reproduzca la distancia entre el peatón y los nodos de anclaje con la mayor precisión posible.

El método propuesto 2 se considera la distancia entre otros peatones, además de la distancia entre el peatón y los nodos de anclaje. Como resultado, el método propuesto 2 mejora la precisión de localización del método propuesto 1.

Conclusiones

En este trabajo de investigación se demostró la efectividad de usar solo información de contacto binaria. Los resultados de un experimento de localización realizado con dispositivos reales y los de experimentos de simulación han demostrado que el método de localización basado en la respuesta del sensor se puede aplicar a tareas de localización en espacios cerrados. A través de los experimentos de simulación, se encontró, que los métodos propuestos pueden obtener una precisión comparable a los

métodos existentes cuando el modelo de atenuación es preciso. Además, quedó confirmado que los métodos propuestos, que solo consideran la información de contacto, son robustos frente a los cambios ambientales incluso cuando el modelo de atenuación es inexacto.

3.8 Comparación de técnicas de trilateración y aprendizaje supervisado para BLE

Descripción del trabajo

Este trabajo de investigación (Maduranga, 2021) realiza un estudio comparativo de técnicas de trilateración versus modelos de aprendizaje supervisado para estimar la posición de un nodo móvil en un ambiente interior.

El banco de pruebas del experimento consta de tres nodos de sensores de *beacons* diseñados con tecnología inalámbrica *Bluetooth Low Energy* (BLE) y un nodo móvil. Se utilizan las lecturas de RSSI en el nodo móvil de tres nodos de acceso inalámbrico de *beacons* estacionarios.

Se entrenaron tres modelos de regresión populares, a saber, los algoritmos de regresión de árbol de decisión (DTR), regresión de bosque aleatorio (RFR) y regresión de vector de soporte (SVR) utilizando el conjunto de datos. Asimismo, se realizaron técnicas de trilateración para obtener la ubicación estimada.

Objetivo

Comparar la precisión de localización obtenida mediante técnicas de trilateración y aprendizaje supervisado. Han realizado su experimento para determinar la ubicación de localización de un móvil nodo sensor con valores RSSI que reciben de sus tres *beacons*.

Métodos y técnicas

La trilateración es un tipo de algoritmo determinista, utilizado para encontrar una ubicación desconocida de un nodo de sensor móvil, con valores RSSI recibidos de sus *beacons*. La trilateración requirió al menos tres *beacons* para calcular la ubicación desconocida del nodo móvil.

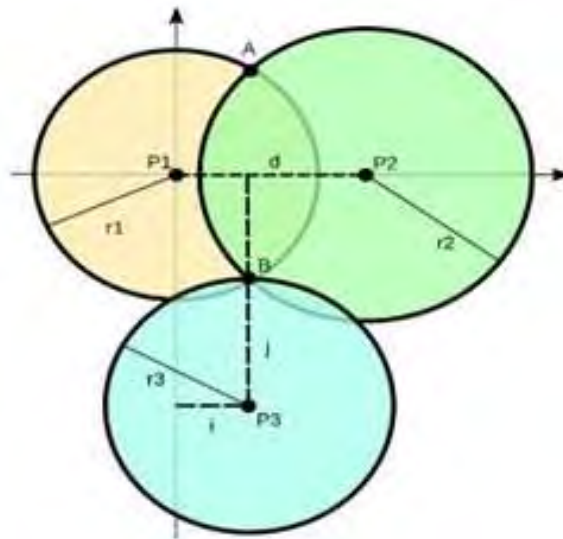


Figura 3.3 Posicionamiento algoritmo de trilateración

Algoritmo de regresión de árbol de decisión (DTR), Este algoritmo de aprendizaje supervisado construye una estructura de árbol a través del algoritmo central *Iterative Dichotomiser 3* (ID3). sigue un enfoque codicioso al crear las ramas en el árbol de decisión seleccionando el rendimiento más alto de reducción de la desviación estándar en el enfoque de regresión. Además, la desviación estándar se usa para calcular la homogeneidad de una muestra numérica.

Regresión de bosque aleatorio, utiliza la técnica de agregación (empaquetado) de arranque como su modelo de conjunto. Esta es una técnica para reducir la varianza de las predicciones. El algoritmo *Random Forest Regression* construye multitud de árboles de decisión durante el entrenamiento del modelo.

Regresión de vectores soporte (SVR) aplica los principios de algoritmos similares de *Support Vector Machine* (SVM) para problemas de clasificación con pocos cambios menores. El algoritmo SVR también mantiene la característica del margen máximo de SVM; sin embargo, en el enfoque de regresión, SVR mantiene un ϵ y el margen de tolerancia.

Conclusiones

En este trabajo de investigación se realizó una comparación de las precisiones de localización obtenidas a través de técnicas de trilateración y técnicas de aprendizaje automático supervisado. También se implementaron algoritmos de aprendizaje supervisado basados en regresión (Árbol de decisión, Regresión de bosque aleatorio y Regresión de vector de soporte) para el entrenamiento del modelo. La precisión de la localización se midió obteniendo el valor cuadrático medio (MSE), una medida estadística del error cometido durante la predicción. Todos los algoritmos de aprendizaje automático arrojaron un error de MSE mucho menor que el error cometido durante el enfoque de Trilateración.

3.9 Exploración del espacio de diseño de un sistema de localización en espacios cerrados basado en IA multimodelo

Descripción del trabajo

En este trabajo de investigación (Kotrotsios, 2021) presentan los resultados de un proceso de evaluación y optimización del rendimiento de un sistema de posicionamiento en espacios cerrados (IPS) diseñado para operar en sistemas integrados portátiles y miniaturizados.

El método aquí propuesto, utiliza los valores del indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI), de múltiples *beacons Bluetooth* de baja energía (BLE) dispersas por los espacios cerrados. Las señales de los *beacons* fueron recibidas de los dispositivos de los usuarios, y se procesaron a través de un filtro RSSI y un grupo de modelos de aprendizaje automático (ML), en una disposición de un modelo por nodo detectado.

Finalmente, se resolvió un problema de multilateración utilizando como entrada las distancias inferidas desde los nodos publicitarios y devolviendo la aproximación de la posición final.

Objetivo

El objetivo de este trabajo de investigación es doble. Primero investigar la relación de la complejidad de la *Neural Network* con la precisión y el costo de implementación, y segundo investigar la hipótesis de que es factible el desarrollo de un sistema embebido en formato pequeño, capaz de proporcionar un nivel de precisión aceptable como un IPS.

Métodos y técnicas

En este trabajo de investigación evaluaron diferentes métodos ML y arquitecturas NN y evaluaron el impacto en la precisión alcanzable de método propuesto, así como en el tamaño del modelo y los requisitos de memoria relacionados para almacenar el modelo y ejecutar la aplicación de posicionamiento en el dispositivo del usuario. Posteriormente, exploraron las técnicas de optimización del modelo ML de última generación para reducir la huella de memoria del modelo resultante aplicando la poda y la cuantificación de NN.

Ampliaron el espacio de diseño de sistemas integrados, aplicando el marco TFLite Micro ML de última generación para portar los modelos ML validados experimentalmente en dispositivos de teléfonos inteligentes para ejecutarlos en nodos de IoT con recursos limitados utilizando como plataforma de desarrollo de referencia basada en un microcontrolador de última generación con soporte de conectividad BLE.

Conclusiones

En este trabajo de investigación, se demostró que los modelos resultantes lograron finalmente un rendimiento mejorado al ejecutarse en un dispositivo integrado basado en un microcontrolador con un factor de forma pequeño. través de la exploración del espacio de diseño en este trabajo, alcanzando una serie de innovaciones.

Primero lograron una excelente precisión de posicionamiento en espacios cerrados a través del modelo optimizado presentado en un escenario de aplicación típico en condiciones realistas, reduciendo el error promedio por debajo de 25 cm. Además, se presentó una metodología para mejorar el rendimiento de la aplicación a través de un diseño de modelo ML, demostrando las interdependencias entre los parámetros arquitectónicos de NN y el proceso de aprendizaje para derivar el modelo ML final que ejecutará la aplicación para la inferencia de posición.

3.10 Localización precisa en espacios cerrados sin cuadrícula basada en múltiples beacons *Bluetooth* y aprendizaje automático.

Descripción del trabajo

Este trabajo de investigación (Orphanoudakis., 2021) presenta un sistema para encontrar ubicaciones en espacios cerrados con alta precisión en tiempo real haciendo uso de los valores RSSI de *Bluetooth* obtenidos de los teléfonos inteligentes. Además, utilizan *beacons Bluetooth*, porque, tienen varias ventajas frente a otras tecnologías de localización en espacios cerrados. La principal ventaja de este enfoque es, que el costo de la infraestructura requerida es bajo, ya que solo requiere una cantidad de *beacons Bluetooth* (experimenta con una proporción de 1 *beacons* aproximadamente 6 m² de espacio interno para lograr la mejor cobertura sin puntos ciegos) dispersos por el espacio interior en posiciones predefinidas y conocidas

Objetivo

Diseñar un sistema de posicionamiento para encontrar ubicaciones en espacios cerrados con alta precisión en tiempo real, haciendo uso de los valores RSSI de *Bluetooth* obtenidos de los teléfonos inteligentes.

Métodos y técnicas

Este trabajo divide su enfoque de estimación de ubicación interna en tres fases.

- En la primera fase, el sistema, hace uso de un conjunto de modelos de aprendizaje automático (uno para cada *beacons* desplegado en el espacio interior). Estos modelos se utilizan para predecir la distancia desde el teléfono inteligente y un *beacons* específico en función de la medición del nivel RSSI actual y su comparación con mediciones anteriores recopiladas y utilizadas durante la fase de entrenamiento.

- En la fase dos, el sistema, toma como entrada las distancias de los *beacons* de la primera fase y calcula las periferias de círculos que tienen como centro la ubicación de las *beacons* y como radio las distancias encontradas en la fase uno. Después de eso, encuentra los puntos de intersección de todos los círculos.
- En la tercera y última fase, el sistema, obtiene como entrada los puntos de intersección de la fase dos y encuentra la mediana geométrica de los puntos de intersección. Este punto medio geométrico se define como la ubicación estimada.

Conclusiones

En este trabajo de investigación consideraron los desafíos de desarrollar un sistema utilizando RSSI de *Bluetooth Beacons*, siguiendo un enfoque de aprendizaje automático. Crearon un conjunto de datos con valores de *Bluetooth* RSSI y entrenaron el modelo de red neuronal para predecir la distancia desde un *beacons* específico. Posteriormente, utilizaron las distancias pronosticadas para encontrar los puntos de intersección y usó la mediana geométrica de estos puntos como la estimación final de la ubicación.

El sistema diseñado en este trabajo de investigación no requiere ningún tipo de cuadrícula en el diseño del espacio interior y se muestra que logra un error promedio de 69,58 cm. En general, la posición del usuario se estimó con un error de localización inferior a 1 m en el 80,55 % de los casos.

3.11 Posicionamiento preciso en espacios cerrados basado en *beacons Bluetooth* mediante aprendizaje automático

Descripción del trabajo

En este trabajo de investigación (Orphanoudakis, 2019) la búsqueda de la ubicación se realiza utilizando el valor medido del indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI) de los *beacons Bluetooth*, recibidas de los teléfonos móviles combinados con las mediciones de otros sensores del teléfono.

Para el desarrollo de este trabajo recolectaron medidas de los valores RSSI de *Beacons* que fueron colocados en un espacio de 30,75 m², y los valores del acelerómetro móvil en movimiento. Dividieron el espacio en 16 subáreas de 1,45 m, 1,35 m, utilizaron las medidas para desarrollar un modelo de aprendizaje automático utilizando el marco *TensorFlow* de código abierto para predecir la subárea correcta del usuario.

A través de experimentos, en este trabajo de investigación demostraron que el modelo desarrollado puede alcanzar una precisión de 0,7209, lo que significa que el sistema puede predecir la ubicación correcta del usuario en el 72 % de los casos con una precisión inferior a 1 metro.

Objetivo

Desarrollar un sistema de localización en espacios cerrados, con alta precisión y monitoreo continuo de posición en tiempo real, con el uso de un teléfono móvil sin ningún hardware especial utilizando únicamente sensores de bajo costo disponibles comercialmente.

Métodos y técnicas

Para encontrar la ubicación en el presente trabajo de investigación desarrollaron un sistema que utiliza un modelo de redes neuronales artificiales de aprendizaje automático. Como parámetros de entrada en el modelo se utilizan los valores RSSI de los *beacons Bluetooth* distribuidas en el área de interés, las mediciones del acelerómetro móvil y la ubicación estimada del usuario. El objetivo de la red neuronal es predecir la posición actual del usuario.

Después de la instalación de los *beacons* (y su ubicación en un mapa 2D), para que el método se aplique, el área del edificio debe dividirse en subáreas donde se deben realizar una serie de mediciones para que la ANN que se utiliza, pueda ser entrenada antes entrar en un estado operativo.

Luego de haber entrenado a la ANN, en una implementación práctica, cuando un usuario ingresa a un edificio por primera vez, tiene que descargar e instalar una aplicación en su teléfono inteligente. Este paso inicial es necesario para que pudiera autorizar al sistema a recopilar información de

su posición y otros datos que pueden considerarse como información privada sensible y utilizar el servicio de posicionamiento interno soportado por el método propuesto.

Conclusiones

En este trabajo de investigación, consideraron los desafíos de desarrollar un sistema mediante el uso de RSSI de los *beacons Bluetooth* y los valores del acelerómetro de un teléfono inteligente en un modelo de red neuronal artificial.

También crearon un conjunto de datos con valores de Bluetooth RSSI y acelerómetro de teléfono inteligente y entrenaron un modelo de red neuronal. Demostrando que este modelo alcanza una precisión promedio de 0,72089, que a su vez expresa la probabilidad de que la posición del usuario se estime con un error de localización superior a 1 metro.

3.12 Comparativa de trabajos relacionados

En este capítulo se presenta una comparación de trabajos de investigación relacionados con el desarrollo de la presente tesis, tomando en cuenta los siguientes campos a describir:

- **Trabajo de investigación:** Se coloca el nombre correspondiente al trabajo de investigación utilizado.
- **Información Proporcionada:** Se inserta la información relacionada con el tipo de tecnología, métodos, y utilidad que utilizan en el trabajo de investigación relacionado.
- **Área de aplicación:** En esta columna se coloca información referente al sector al que fue dirigida la investigación (Educativo, comercial, empresarial, privado o público).
- **Tipo de transmisión:** Está relacionada con la forma en la que se obtiene la comunicación entre dispositivo y tecnología utilizada.
- **Algoritmo:** En esta sección, se coloca toda la información relacionada con el tipo de algoritmos de localización en espacios cerrados utiliza o expone el trabajo de investigación estudiado.

En los trabajos de investigación se tiene presente que la exactitud y precisión en la ubicación de un dispositivo en espacios interiores se considera como el acercamiento de la estimación realizada por el sistema al dispositivo, pero también se considera las veces que el sistema haya presentado error de ubicación.

Tomando en cuenta la investigación realizada de la literatura existente, podemos concluir que las técnicas más destacadas para la ubicación en espacios cerrados son:

- Trilateración
 - ToA (Tiempo de arribo)
 - TSOA (Diferencia de tiempo de llegada)
 - RSS (Atenuación de señal)
 - RoTf (Tiempo de retorno de la señal)
- Triangulación
 - AoA (Ángulo de llegada)
 - Método kNN (k vecinos más próximos)
 - Redes Neuronales
 - Máquinas de Vectores de apoyo SVM
- Técnicas de proximidad
 - Tecnologías de radio
 - WiFi
 - BLE
 - Zigbee
- Multilateración
- *Fingerprinting*
- Probabilidad

Hoy en día, realizar una ubicación de un dispositivo móvil en espacios cerrados es muy complicado, derivado de los movimientos que tienen los usuarios dentro de un espacio cerrado, por los espacios con dificultad de visión directa ya sea por los muebles, objetos de todo tipo o superficies reflectantes.

La técnica que mejores resultados a tenido en ubicar un dispositivo en espacios cerrados, es la basada en medidas de radiofrecuencia, donde las mediciones se realizan tomando en cuenta la potencia de señal RSSI recibida.

Existen varias técnicas que permiten lograr una ubicación en espacios interiores mencionadas en la literatura investigada, algunos de ellos son: *Fingerprinting*, Trilateración, Triangulación, Multilateración, Probabilidad y Proximidad, coincidiendo en un mismo punto, realizar una estimación de ubicación en espacios interiores lo más exacta posible, utilizando algoritmos de ubicación basados en RSSI, AoA, ToA, KNN, WiFi.

En el presente trabajo de investigación, ubicar dispositivos móviles dentro de un ambiente cerrado es algo de vital importancia, por esta razón se decidió trabajar la ubicación en interiores utilizando la tecnología BLE de los dispositivos *beacons*. Para este caso localización en espacios cerrados basada en zonas, es importante mencionar que los dispositivos BLE son de bajo consumo de energía, pero su funcionamiento presenta considerables variaciones en cuanto a la obtención de la señal

RSSI, arrojando mediciones de distancia del dispositivo móvil inestables por consecuencia una ubicación desfasada del lugar esperado.

Para ayudar a que las señales obtenidas tengan una estabilidad mejor y se pueda ubicar un dispositivo móvil en espacios cerrados, se decide incorporar el algoritmo de trilateración que basa su funcionamiento en medir las distancias que existen entre varios puntos específicos, procesa los valores RSSI obtenidos y posteriormente los convierte en distancia para brindar una ubicación específica del dispositivo móvil dentro de un espacio cerrado con un margen de error mínimo. Este algoritmo utiliza como mínimo la señal RSSI de tres *beacons*, siendo éstas las de mayor intensidad, ignorando las demás señales que se encuentren en el rango. En caso de que las señales recibidas sean menores a las tres requeridas, la aplicación mostrará la última ubicación registrada del dispositivo móvil, garantizando con esto mejorar la ubicación del dispositivo en espacios cerrados.

3.13 Tabla comparativa de trabajos relacionados con este proyecto

Como conclusión de este capítulo, en la tabla 3.3 se presenta una comparación de los trabajos relacionados, encontrados en la literatura.

Tabla 3.3 Tabla comparativa trabajos relacionados

Trabajo de investigación	Información proporcionada	Área de aplicación	Tipo de transmisión	Algoritmo
Una revisión de los sistemas de posicionamiento en interiores (Wahab, 2022).	Tecnologías, algoritmos y técnicas de posicionamiento en espacios cerrados.	General	Radiofrecuencia Sonido Satélite Magnético Inerciales	AoA ADoA PoA RSSI ToA RTT
Un esquema de localización interior diferencialmente privado con fusión de <i>fingerprints WiFi</i> y <i>bluetooth</i> en la computación de borde (Zhang, 2022)	Localización en espacios cerrados	Privada	ML WiFi	<i>Fingerprint</i> RSSI
Localización en espacios cerrados mediante <i>Bluetooth</i> de baja energía para grandes zonas industriales e infraestructuras limitadas (Szyc, 2023)	Localización en espacios cerrados	Agricultura	BLE	RSSI Anillo Seccional Masa Multilateración
Una aplicación IoT de bajo consumo que utiliza <i>beacons</i> para la localización en espacios cerrados (Pascale, 2021)	Localización en espacios cerrados, métodos, tecnologías y aplicaciones IoT.	General	BLE <i>Beacons</i>	RSSI Trilateración
Modelización del comportamiento de un sistema de localización en espacios cerrados basado en <i>beacons</i> (Bilbao-Jayo, 2021)	Posicionamiento en espacios cerrados	Vivienda Genérica	BLE <i>Beacons</i>	Incrustaciones neuronales
Localización de peatones en espacios cerrados basada en información de contacto mediante <i>beacons Bluetooth</i> de baja energía (Shiraki, 2022)	Localización en espacios cerrados	General	BLE <i>Beacons</i>	RSSI Multilateración Localización cooperativa
Comparación de técnicas de trilateración y aprendizaje supervisado para BLE (Maduranga, 2021)	Ambiente interior	General	BLE <i>Beacons</i>	Trilateración RSSI DTR RFR

Continuación Tabla comparativa de trabajos relacionados con este proyecto

Trabajo de investigación	Información proporcionada	Área de aplicación	Tipo de transmisión	Algoritmo
Exploración del espacio de diseño de un sistema de localización en espacios cerrados basado en IA multimodelo (Kotrotsios, 2021)	Posicionamiento en espacios cerrados (IPS)	General	BLE <i>Beacons</i>	RSSI ML Multirateración
Localización precisa en espacios cerrados sin cuadrícula basada en múltiples <i>beacons Bluetooth</i> y aprendizaje automático (Orphanoudakis., 2021)	Ubicación en espacios cerrados	General	BLE <i>Beacons</i>	RSSI Red neuronal
Posicionamiento preciso en espacios cerrados basado en <i>beacons Bluetooth</i> mediante aprendizaje automático (Orphanoudakis, 2019)	Ubicación en espacios cerrados	General	BLE <i>Beacons</i> Acelerómetro	RSSI Red neuronal

Capítulo 4

Metodología de Solución para Ubicación en Espacios Cerrados

En este capítulo se describe la metodología de solución de la aplicación para la ubicación en espacios cerrados utilizando la tecnología *beacons*.

4. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN PARA UBICACIÓN EN ESPACIOS CERRADOS

4.1 Descripción general de la metodología a utilizar

En el presente trabajo de investigación se realizó el desarrollo de una aplicación móvil que permite dar el salto a las ciudades inteligentes. La aplicación es capaz de brindar ayuda a los usuarios para proporcionar su ubicación en espacios cerrados, mejorando la experiencia de los usuarios que la utilizan. De aquí en adelante, llamaremos a la aplicación como *Ubico*.

Para su correcto funcionamiento, *ubico* hace uso de un teléfono inteligente por medio del cual recopila la información necesaria del entorno donde se encuentra ubicado, apoyándose de dispositivos llamados *beacons*, que recopilan la información de contexto.

Para el desarrollo de *Ubico* se creó una aplicación para un administrador **Ubico Administrador**, que es utilizada por un usuario destinado por la organización, quien tiene el control de la misma, para realizar manipulaciones de datos nuevos y los ya almacenados. La segunda aplicación **Ubico Usuario** diseñada para ser manipulada por usuarios en general, permite ubicar un dispositivo móvil dentro de un espacio cerrado”.

La aplicación *Ubico* fue desarrollada apoyándose en las fases de análisis y diseño, algoritmo de localización, implementación y pruebas, las cuales son explicadas brevemente a continuación.

- **Fase de Análisis, configuración e instalación de la infraestructura *beacons***
En esta primera fase se definen las zonas en espacios cerrados donde se colocarán los *beacons*, los cuales permitirán mostrar la ubicación del celular que se encuentre dentro del rango que emiten los *beacons*.
- **Fase Algoritmo de localización**
En esta segunda fase se hace uso del algoritmo de localización basado en trilateración para espacios cerrados, el cual, con un mínimo de tres *beacons* y sus respectivas zonas, es posible aproximar la ubicación de un objeto móvil.
- **Fase de Implementación**
Esta fase de implementación es la encargada de brindarle al usuario la interfaz mediante la cual con ayuda de su dispositivo móvil pueda ubicarse espacios cerrados, y pueda ubicar un celular dentro del mismo espacio.
La interfaz que permite obtener la información de contexto le permite al administrador monitorear la información generada por el usuario, al momento de la interacción con la aplicación.
- **Fase de Pruebas**
En esta fase se presenta un algoritmo de localización en espacios cerrados, utilizando la tecnología *Beacons estimate*, del cual se obtiene la señal RSSI, a través del algoritmo de posicionamiento de tiempo real, y consultando estos resultados en la base de datos MySQL, se muestra la posición actual del dispositivo móvil para llevar a cabo el proceso de posicionamiento.

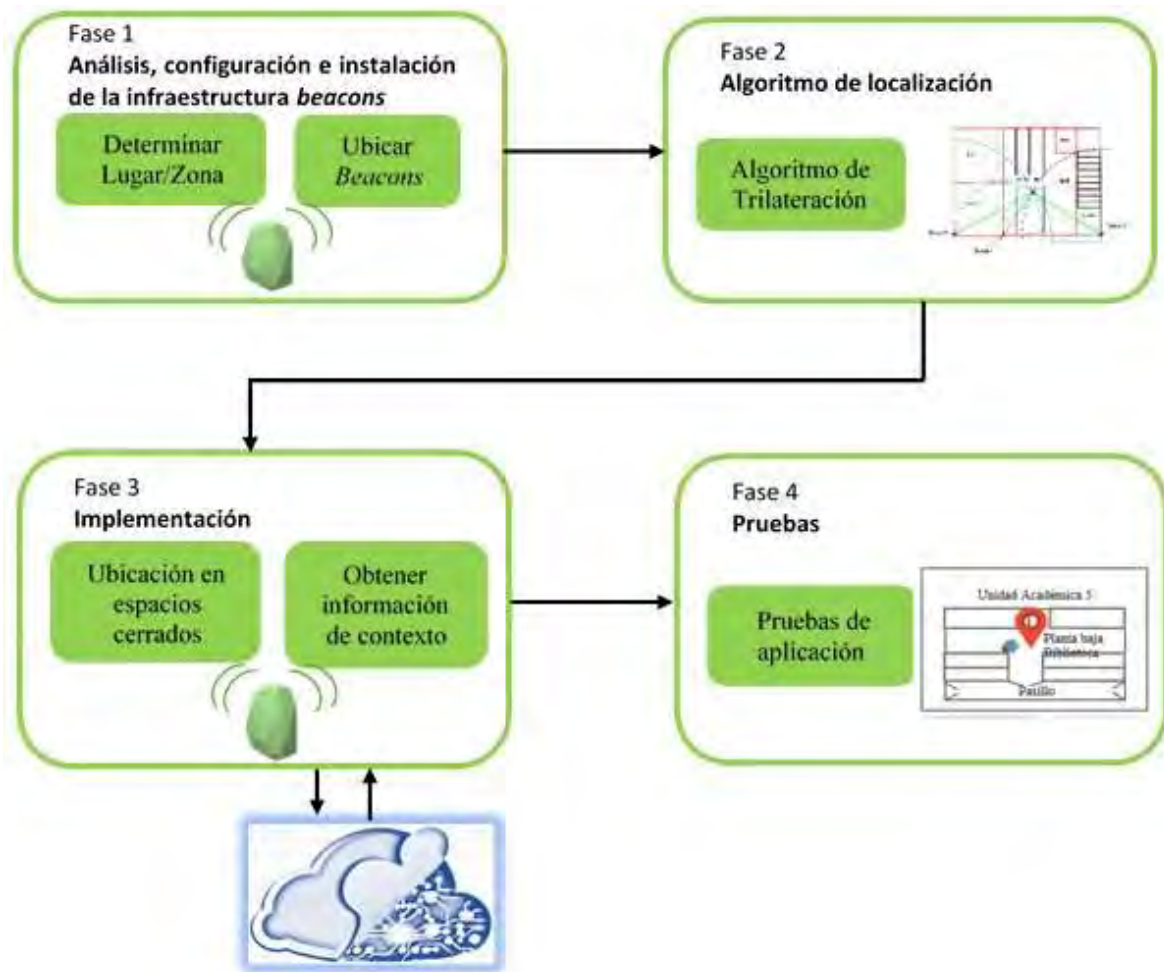


Figura 4.1 Metodología de solución

4.2 Análisis, configuración e instalación de la infraestructura *beacons*

A continuación, se definen las zonas que permitirán ubicar un dispositivo móvil en espacios cerrados.

En la presente investigación se llevó a cabo una aplicación para dispositivos móviles con sistema Android llamada *Ubico* administrador, misma que está compuesta de los módulos instituciones, *beacons* y ubicación.

Instituciones

El modulo Instituciones es la encargada de la gestión de las zonas de las cuales obtenemos la información del contexto necesaria, que servirán de apoyo para realizar las ubicaciones de dispositivos móviles en espacios cerrados, pertenecientes a las instituciones registradas con anterioridad.

Beacons

La tecnología a utilizar en la investigación son los *beacons* de *estimote*, derivado de su bajo costo, fácil manejo, configuración y apoyo web, documentación fácil de encontrar y sobre todo un SDK robusto.

El registro y configuración de los *beacons* se lleva a cabo dentro de la plataforma *Estimote*, donde se manipula los datos como el nombre del *beacons*, el id del *beacons*, los valores *major*, *minor*, *uuid*, *tag*, *attachment*, *txpower*, valores que serán de gran utilidad al momento de realizar la ubicación en espacios cerrados.

Ubicaciones

En este módulo se gestiona la parte de la institución y las zonas definidas con anterioridad, información que permitirá al usuario ubicarse y ubicar un dispositivo móvil dentro de un espacio interior del departamento.

4.3 Algoritmo de localización

En este trabajo de investigación se presenta un algoritmo de localización en espacios cerrados utilizando la tecnología *Beacons estimote*, del cual se obtiene la señal RSSI. A través del algoritmo de posicionamiento en tiempo real, y consultando estos resultados en la base de datos MySQL, se muestra la posición actual del dispositivo móvil para llevar a cabo el proceso de posicionamiento. Durante esta investigación, se encontró que Android es la plataforma más adecuada para implementar este proyecto. Ya que Android es un sistema operativo móvil (SO) de código abierto y gratuito para los desarrolladores. A continuación, en la figura 4.2, se muestra el diagrama de flujo del sistema:

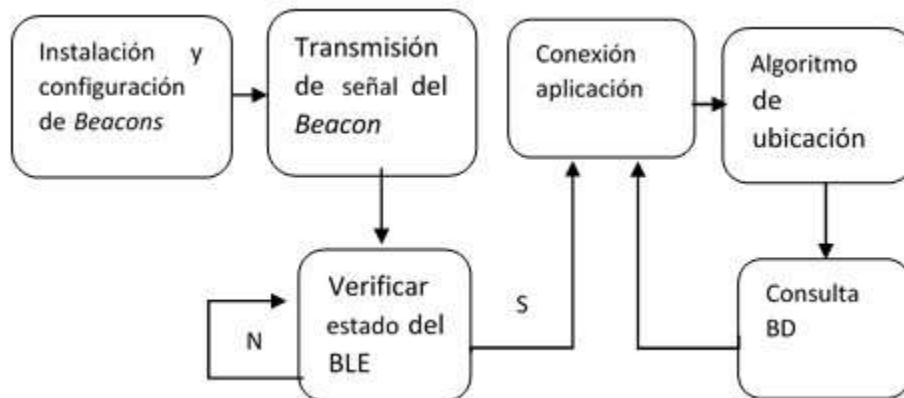


Figura 4.2 Diagrama de flujo para la consulta de ubicación

4.3.1 Localización a partir de la señal RSSI

Para calcular la distancia entre los dispositivos de radio utilizando RSSI, se emplea un modelo de propagación de radio adecuado. Los diferentes obstáculos entre el transmisor y el receptor como paredes, muebles e incluso cuerpos humanos ocasionan una pérdida de propagación de la señal de radio debido a la absorción y desviación ocasionada por estos obstáculos, la cual no puede ser

tomada a la ligera. Por lo tanto, se optó por utilizar, un modelo de propagación para espacios cerrados utilizando la ecuación. (4.1):

$$D = 10^{((TxPower-RSSI)/(10*n))}$$

Ecuación 4.1 Cálculo de la distancia D, a partir de la señal RSSI (1)

donde:

RSSI es el nodo de potencia de referencia recibido, d es la distancia entre los nodos de referencia, TxPower se define como la energía absoluta que representa en dBm a una distancia de 1 metro del transmisor, n es la constante de transmisión de la señal y es relevante para el entorno de transmisión de la señal.

4.3.2 Algoritmo de trilateración

A continuación, se presenta un algoritmo de localización basado en trilateración. Con un mínimo de tres *beacons* y sus respectivas posiciones. Es posible aproximar la ubicación de un objeto móvil, esto se consigue trazando una circunferencia con radio 'distancia medida' y centro en cada *beacons*. La región determinada por la intersección de las circunferencias determina la posición estimada del objeto. Cuantas más anclas tengamos más precisión obtendremos.

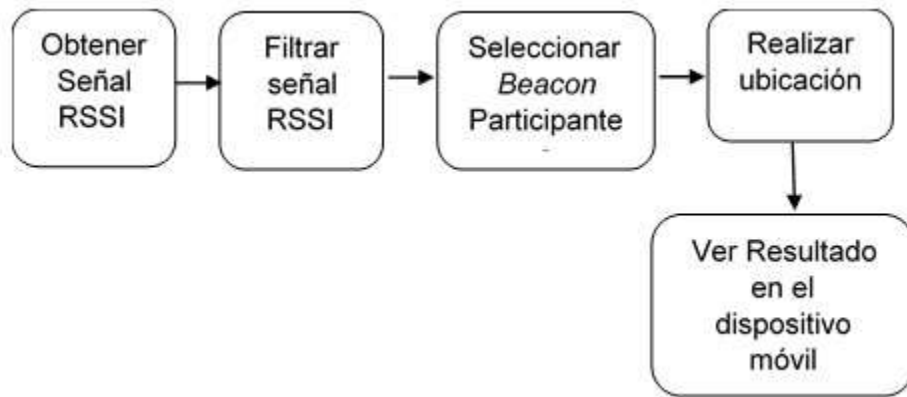


Figura 4.3 Diagrama para determinar la ubicación

A continuación, se definen las siguientes ecuaciones para el algoritmo de trilateración:

$$r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

Ecuación 4.2 Localización a partir de la señal RSSI (2)

$$r_2^2 = (x - d)^2 + y^2 + z^2$$

Ecuación 4.3 Localización a partir de la señal RSSI (3)

$$r_3^2 = (x - i)^2 + (y - j)^2 + z^2$$

Ecuación 4.4 Localización a partir de la señal RSSI (4)

Restamos la Ecuación 4.2 y la ecuación 4.3 y resolvemos en X:

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d}$$

Ecuación 4.5 Localización a partir de la señal RSSI (5)

El resultado de la operación anterior lo sustituimos en la ecuación 4.2

$$y^2 + z^2 = r_1^2 - \frac{(r_1^2 - r_2^2 + d^2)^2}{4d^2}$$

Ecuación 4.6 Localización a partir de la señal RSSI (6)

Posteriormente igualamos en ecuación 4.4, para obtener Y:

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 - x^2 + (x - i)^2 + j^2}{2j} = \frac{r_1^2 - r_3^2 - i^2 + j^2}{2j} - \frac{i}{j}x$$

Ecuación 4.7 Localización a partir de la señal RSSI

Por ultimo despejamos Z en ecuación 4.2

$$Z = \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2}$$

Ecuación 4.8 Localización a partir de la señal RSSI

4.4 Implementación

En la figura 4.4 se presenta la arquitectura basada en capas (tres niveles) correspondiente a la aplicación “Ubico Administrador y ubico Usuario” en la capa de aplicación. Desarrolladas con la herramienta *Android Studio*, utilizando *Node js* para la capa de servicios y el servidor *apache* para la capa de web.

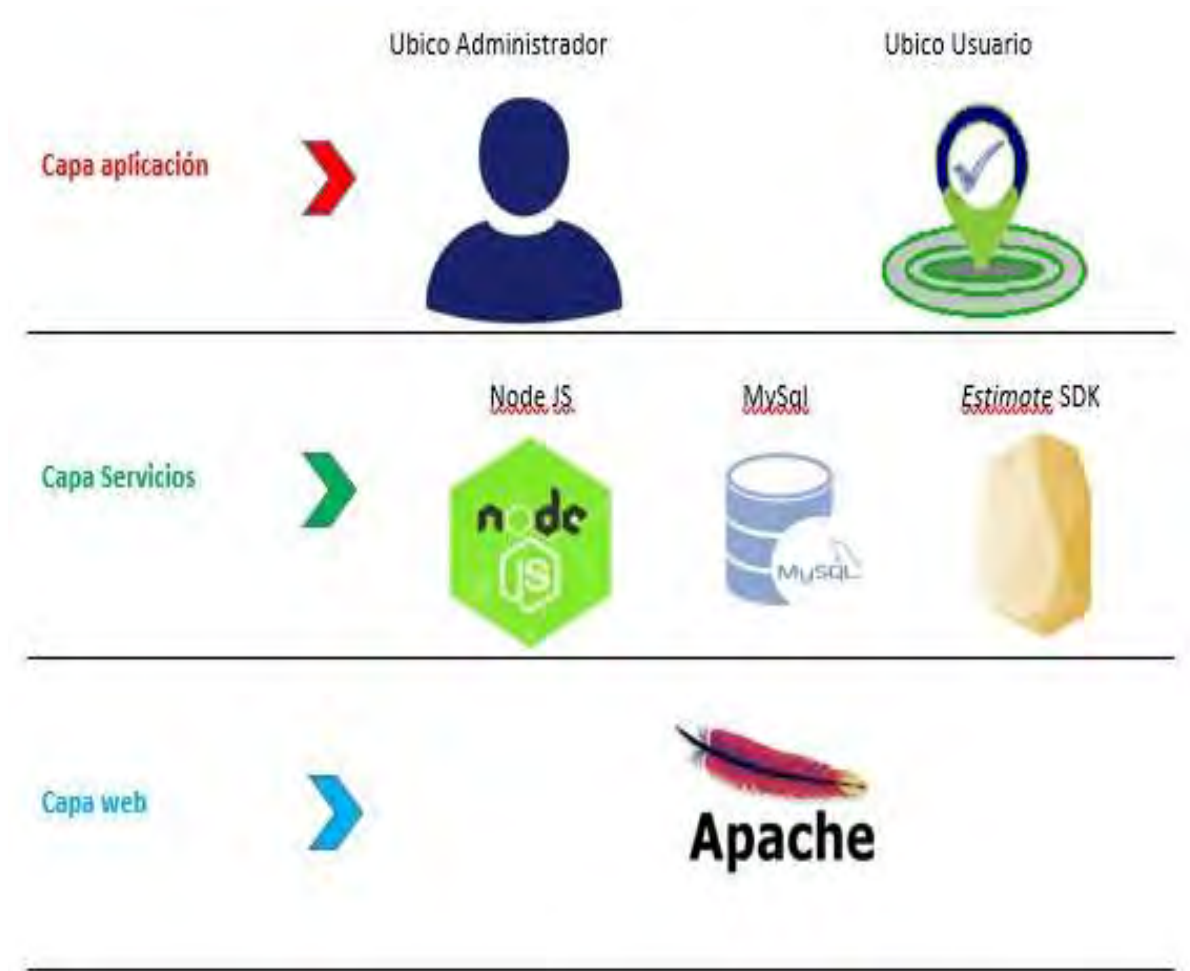


Figura 4.4 Arquitectura Ubico

4.4.1 Ubico Administrador

Ubico administrador está pensada para todas aquellas personas que tienen una responsabilidad como administradores, jefes o para los dueños de la organización. Esta aplicación móvil se compone de un registro del usuario tipo administrador, un registro de las instituciones, zonas y *beacons*. Dicho registro como se mencionó queda a cargo del administrador, para posteriormente obtener información de contexto de la institución, misma que permitirá obtener la infraestructura necesaria para realizar una búsqueda disponible en el interior de los edificios.

A continuación, en la figura 4.5 se muestra una vista de la pantalla principal de Ubico para administradores y se da una breve descripción de los módulos que la conforman.



Figura 4.5 Aplicación Móvil Ubico

4.4.1.2 Módulo Organización

En este módulo de organización se crean las organizaciones en donde se quiere hacer la navegación en espacios cerrados, compréndase organización como un conjunto de estructuras administrativas con las mismas metas u objetivos. Las organizaciones son dadas de alta únicamente con los usuarios de tipo administrador de organización ya que este rol solamente tiene este privilegio. En este módulo también se tiene la opción de eliminar y actualizar dicha organización. En la Figura 4.6 se muestra el menú principal CRUD correspondiente al módulo de Organización y en la figura 4.7 se muestra la interfaz gráfica para el registro de una organización.



Figura 4.6 CRUD Organización



Figura 4.7 Alta Organización

En la siguiente figura 4.8 se muestra un ejemplo del registro de la Organización llamada **Cenidet** y la figura 4.9 muestra un ejemplo de eliminación de una organización, donde por medio de un menú emergente nos pide seleccionar la organización a eliminar.



Figura 4.8 Registro Organización



Figura 4.9 Eliminar Organización

4.4.1.3 Módulo Departamento

En este módulo de organizaciones se mantiene el registro de los departamentos que conforman la organización, donde se lleva a cabo la gestión de las zonas para la ubicación de los *beacons* a trabajar en espacios cerrados. En la Figura 4.10 se muestra el menú principal CRUD correspondiente al módulo Departamento, así como la figura 4.11 que muestra la interfaz gráfica para el registro de un Departamento.



Figura 4.10 CRUD Departamentos



Figura 4.11 Alta Departamento

A continuación, en la siguiente figura 4.12 se muestra un ejemplo del registro de un Departamento llamado **Ciencias computacionales** y la figura 4.9 muestra un ejemplo de eliminación de un departamento, donde por medio de un menú emergente nos pide seleccionar la organización a eliminar.



Figura 4.12 Registro Departamento

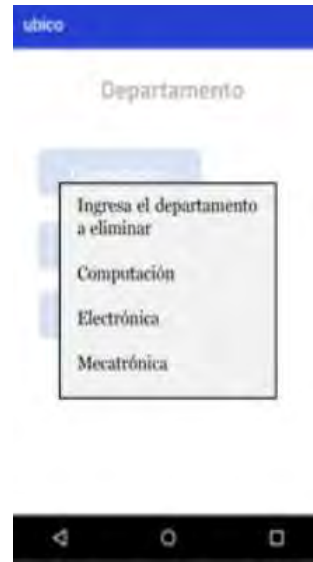


Figura 4.13 Eliminar Departamento

4.4.1.4 Módulo Beacons

En este módulo se realiza la gestión de los *beacons* con los que vamos a trabajar, registrando valores de gran importancia de los mismos, como lo es el UUID, *Major*, *Minor*, la zona en la que se colocaran como el departamento y el piso. Como se muestra en las figuras 4.15 y 4.16.



Figura 4.14 CRUD Beacons



Figura 4.15 Alta Beacons



Figura 4.16 Registro Beacons

4.4.1.5 Módulo Ubicación

Este módulo, es el encargado de gestionar la ubicación de un dispositivo dentro del departamento si este se encuentra dentro. De lo contrario mostrara su última ubicación registrada, dentro del departamento.

Previamente se registraron las zonas de ubicación de los beacons, para que posteriormente sean utilizadas por el algoritmo de trilateración midiendo distancias entre tres beacons, con el fin de mostrar la ubicación del dispositivo más acertada. La siguiente figura 4.17 muestra la interfaz de búsqueda y la figura 4.18 muestra la solicitud de activación del *bluetooth*.



Figura 4.17 Ubicación



Figura 4.18 Activar Bluetooth

En la figura 4.19 se muestra un escaneo de señales RSSI de los *beacons* instalados y la figura 4.20 muestra la ubicación del dispositivo móvil solicitado.



Figura 4.19 Escaneo de beacons

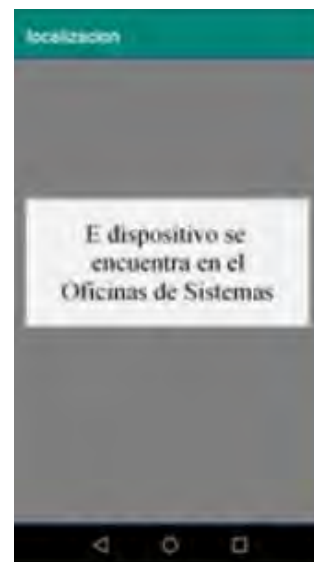


Figura 4.20 Resultado de búsqueda

4.4.1.6 Aplicación Ubico Usuarios

El diseño de este prototipo, corresponde a la parte donde los usuarios, interactúan con la aplicación. Esta aplicación, al ser activada recibe las señales de *bluetooth* de los beacons previamente instalados, mientras se encuentre dentro en el interior del departamento la aplicación se encontrará en constante monitoreo de las señales emitidas.

La aplicación Ubico, se implementó en el sistema operativo Android, y está conformada por los siguientes módulos:

- Registro de usuario
- Inicio de sesión
- Búsqueda de dispositivos
- Ubicación de dispositivo

Para poder hacer uso de la aplicación, los usuarios deberán registrarse, para posteriormente validarse iniciando sesión, lo cual le permitirá realizar búsquedas de dispositivos en el interior del edificio, teniendo la posibilidad de ubicarse el mismo dentro del área. En caso de que el usuario no se encuentre dentro del área cubierta por los beacons, se mostrara su última ubicación.

Para obtener una mejor precisión en la ubicación del dispositivo, se agregó una función que permite reajustar las medidas, esta es la de calibrar, que hace una nueva medición de señal para ser más precisos en la ubicación.

La aplicación tiene como objetivo, ayudar al usuario a ubicar un dispositivo en espacios cerrados. Hace uso del algoritmo de trilateración, el cual se apoya de tres anclas para hacer la ubicación, en caso de que el dispositivo se encuentre dentro de la señal de dos anclas, se hace uso de la función de calibración para lograr una mejor precisión, de lo contrario nos muestra la señal más cercana.

A continuación, en la siguiente figura 4.21 se muestra la pantalla de inicio de sesión de la aplicación.



Figura 4.21 Pantalla Inicio Ubico

Una vez iniciada la sesión como se puede ver en la figura 4.22 el sistema muestra una pantalla de bienvenida acompañada del nombre de la organización en la que se encuentra ubicada. Al presionar el botón de inicio se abrirá una nueva ventana (figura 4.23) en la que se presenta la ubicación donde se encuentra el dispositivo. Además, el usuario podrá ubicar otros dispositivos de su misma organización en espacios cerrados, para esto deberá presionar el botón **iniciar búsqueda** figura 4.24.



Figura 4.22 Bienvenida Ubico

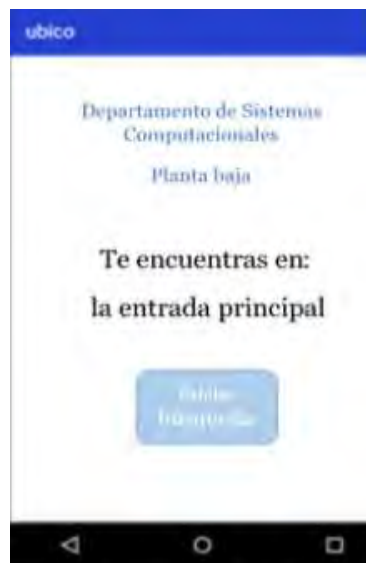


Figura 4.23 Ubicación Actual del dispositivo

La figura 4.24 muestra el campo donde el usuario deberá ingresar el dispositivo móvil al que desea ubicar, posteriormente presiona el botón iniciar búsqueda y le mostrará una ventana emergente figura 4.25 con la ubicación del dispositivo buscado.



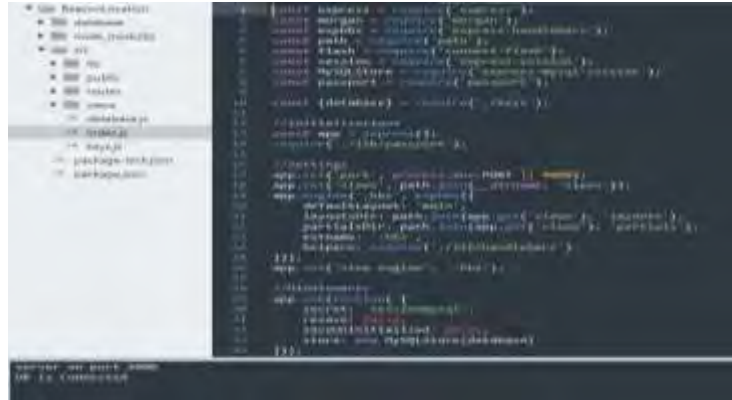
Figura 4.24 Iniciar búsqueda



Figura 4.25 Resultados de búsqueda

4.4.1.7 Node JS

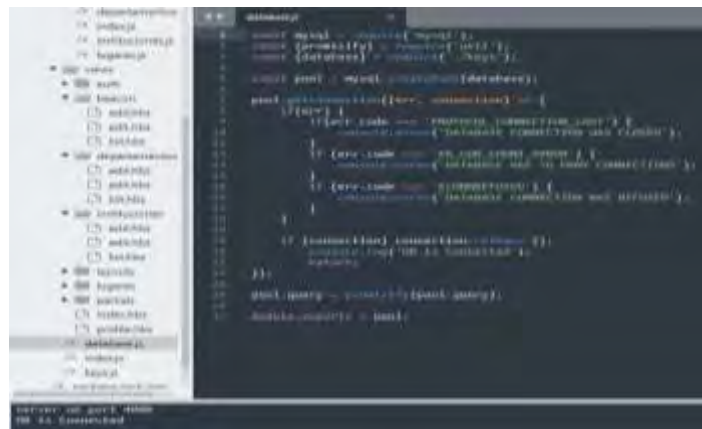
En la figura 4.26 se muestra la parte de la codificación que permite levantar el servidor de la aplicación web en el puerto 4000, quien por el momento solo aloja la base de datos a utilizar en la aplicación móvil Ubico.



```
1 // Importar el módulo de http
2 const http = require('http');
3
4 // Definir el puerto en el que se ejecutará el servidor
5 const PORT = 4000;
6
7 // Crear un servidor de http
8 const server = http.createServer((req, res) => {
9   // Responder con un mensaje de bienvenida
10  res.writeHead(200, { 'Content-Type': 'text/plain' });
11  res.end('Bienvenido al servidor Node.js en el puerto 4000');
12});
13
14 // Escuchar el puerto
15 server.listen(PORT, () => {
16  console.log(`Servidor escuchando en el puerto ${PORT}`);
17});
```

Figura 4.26 Servidor Node JS puerto 4000

En la siguiente figura 4.27 se muestra la conexión de la base de datos creada en MySQL y su conexión con el servidor Node Js.



```
1 // Importar el módulo de mysql
2 const mysql = require('mysql');
3
4 // Definir las credenciales de la base de datos
5 const config = {
6   user: 'root',
7   password: 'password',
8   host: 'localhost',
9   database: 'ubico'
10};
11
12 // Crear una conexión a la base de datos
13 const connection = mysql.createConnection(config);
14
15 // Escuchar el puerto
16 connection.connect((err) => {
17  if (err) {
18    console.error('Error al conectar con la base de datos');
19  } else {
20    console.log('Conexión exitosa con la base de datos');
21  }
22});
```

Figura 4.27 conexión con la base de datos MySQL

4.5 Pruebas

La sección de pruebas es de gran importancia en la presente tesis, considerando que es el resultado de las pruebas realizadas a las aplicaciones Ubico administrador y Ubico usuario, así como también las pruebas de funcionalidad del algoritmo de trilateración, utilizado para ubicar un dispositivo en espacios cerrados. Se implementó un filtrado de señal por promedio para disminuir el rango de error. Se muestran los resultados obtenidos de la implementación del algoritmo de trilateración con la tecnología *beacons BLE* en un sistema de ubicación en espacios cerrados. En el siguiente Capítulo 5 de esta tesis se describe de manera más precisa todos los resultados de las pruebas realizadas.

Capítulo 5

Pruebas y resultados

En este capítulo se describe las pruebas que se llevaron a cabo a la hora de evaluar el funcionamiento del algoritmo usado.

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

El objetivo principal de este capítulo es verificar el funcionamiento del algoritmo de trilateración, mismo que ayuda a buscar la mejor ubicación de un dispositivo en espacios cerrados, utilizando la aplicación diseñada para este propósito, y la tecnología *Beacons*.

Primeramente, se realizó un análisis de la tecnología a utilizar, posteriormente se dio paso a la evaluación del algoritmo de trilateración; para realizar ubicaciones más precisas. Y concluimos con la evaluación del correcto funcionamiento de la aplicación diseñada Ubico.

Los *beacons* utilizados; se ubicaron en lugares específicos para las pruebas a realizar, todo dentro del departamento de computación perteneciente al TecNM/CENIDET.

5.1 Análisis y desarrollo de la tecnología

Beacons, es un dispositivo pequeño de bajo consumo e inalámbrico, que permite la transferencia de señales de radio BLE con dispositivos inteligentes dentro de un rango limitado, y a partir de ahí, poder ejecutar alguna actividad tomando la ubicación del usuario.

Los dispositivos *beacons*, tienen un identificador UUID único, que le permite diferenciarse de otros *beacons* dentro de una red de *beacons*. Los valores *Major* y *Minor*, ayudan a mejorar la precisión y ubicación del *beacons*.

En este caso, asignamos los valores de los Major y Minor de los *Beacons* de la siguiente manera

Major (Se le asignó el nombre del Departamento) **Computación.**

Minor (Se le asignó el nombre de las zonas a ubicar) **Sala de juntas.**

El dispositivo *Beacons*, tiene un alcance aproximado de 50 mts en área libre, en espacios cerrados su intensidad disminuye derivado de los obstáculos que se puedan encontrar como paredes, muros, vidrios, etc.

Para una mejor intensidad y precisión de ubicación en el interior del departamento de computación, se decidió colocar los *Beacons* a una distancia de 10 mts. de su centro, logrando que las señales se superpusieran unas con otras, consiguiendo que el área de búsqueda quedara ampliamente cubierta. Como se puede observar en la figura 5.1



Figura 5.1 Red de Beacons

Durante el proceso de instalación de la red de *Beacons*, nos encontramos con deficiencias de señal, al momento de que la señal atravesaba un muro, la señal se debilitaba y era muy inestable, cuando nos encontramos con ventanas, el vidrio provocaba que la señal sufriera una repetición por consiguiente la señal era totalmente errónea.

Por consiguiente, se determinó que la mejor zona de ubicación de los *Beacons*, tendría que ser en un área donde los muros y paredes si no pudieran ser nulos fueran mínimos, al igual con las ventanas con cristales espejo, la ubicación se dio en un lugar libre de obstáculos.

5.2 Pruebas algoritmo de trilateración

En esta investigación se presenta un algoritmo de localización basado en trilateración. Con un mínimo de tres anclas y sus respectivas posiciones. Al momento en el que el dispositivo móvil se encuentre en el rango de los *beacons* se obtiene la señal RSSI.

Se filtra la señal obtenida para obtener un mejor resultado en la ubicación, ya filtrada la señal RSSI, se ubican los *beacons* más cercanos mínimo 3, y se realiza la ubicación con ayuda del algoritmo de trilateración, mostrando la ubicación del dispositivo móvil en la aplicación.

Los diferentes obstáculos entre el transmisor y el receptor como lo son; paredes, muebles e incluso cuerpos humanos, ocasionan una pérdida de propagación de la señal de radio debido a la absorción y desviación ocasionada por estos obstáculos, la cual no puede ser tomada a la ligera. Por lo tanto, en este trabajo de investigación se optó por utilizar, un modelo de propagación para espacios cerrados utilizando la ecuación 5.1.

$$D = 10^{((TxPower-RSSI)/(10*n))}$$

Ecuación 5.1 Propagación de señal en espacios cerrados

donde:

RSSI es el nodo de potencia de referencia recibido, D es la distancia entre los nodos de referencia, TxPower se define como la energía absoluta que representa en dBm a una distancia de 1 metro del transmisor, n es la constante de transmisión de la señal y es relevante para el entorno de transmisión de la señal.

Como se mencionó anteriormente, existen múltiples obstáculos al momento de obtener la señal RSSI, por lo que se tomaron 10 muestras de la señal RSSI, cada 0.3 metros de distancia, esto con la finalidad de promediar la señal RSSI y poder generar con estos datos una ecuación que nos permita obtener una distancia del objeto más precisa.

La tabla 5.1, muestra la señal recibida de los *beacons*, en la columna final se muestra la señal promedio obtenida de acuerdo a la distancia.

Tabla 5.1 Señal recibida de los beacons

Distancia (m)	Señal recibida por los Beacons (RSSI)										Promedio (RSSI)
0.3	43	39	42	44	42	43	41	42	44	43	42.3
0.6	59	50	49	50	52	48	52	56	51	50	51.7
0.9	62	56	59	56	54	59	56	57	61	102	62.2
1.2	64	89	92	95	72	89	72	70	80	71	74.4
1.5	73	75	84	80	87	79	80	88	87	79	81.2
1.8	80	98	92	76	96	92	79	92	77	76	85.8
2.1	80	83	77	85	77	88	79	86	89	86	83.9
2.4	80	83	79	77	79	73	93	80	68	83	79.5
2.7	81	89	78	95	84	91	84	79	85	89	86

Como podemos observar, las líneas de color azul tienen mucha variación de señal debido a las interferencias del medio (personas, muebles, etc.).

La figura 5.2, presenta un diagrama de flujo para determinar la ubicación del dispositivo móvil empleando tres beacons y el algoritmo de trilateración.

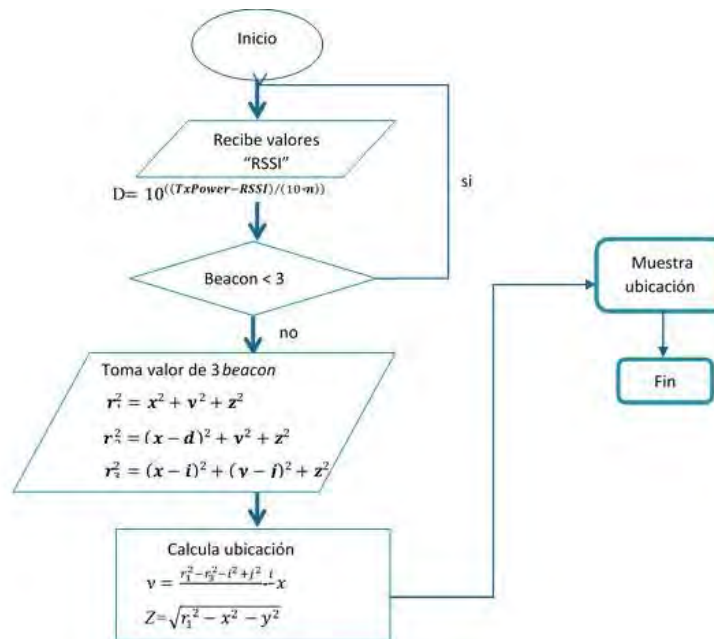


Figura 5.2 Diagrama de flujo para determinar ubicación

Se obtiene la señal RSSI al momento en el que el dispositivo móvil se encuentre en el rango de los *beacons*. Se pretende filtrar la señal ya que es muy inestable para obtener un mejor resultado en la ubicación. Filtrada la señal RSSI se ubican los *beacons* más cercanos, siendo mínimo 3, y se realiza la ubicación con ayuda del algoritmo de trilateración, mostrando la ubicación del dispositivo móvil en la aplicación.

A continuación, en la figura 5.3 se muestra el funcionamiento del algoritmo de trilateración realizando una ubicación en espacios cerrados, con la ayuda de la tecnología *beacons*, los puntos azules representan los tres *beacons* instalados, como se puede observar se simuló que el dispositivo móvil a ubicar se encuentra dentro del departamento de computación perteneciente al TecNM/CENIDET.

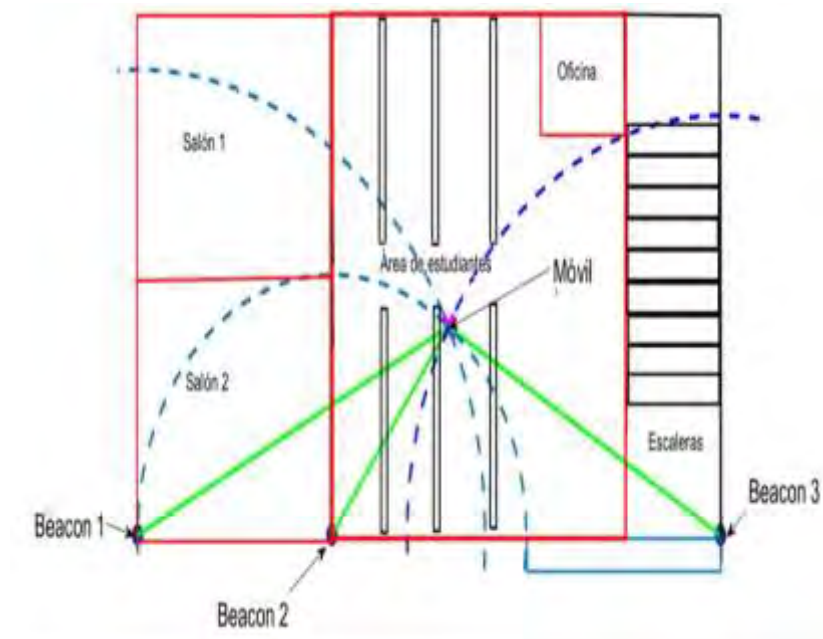


Figura 5.3 Funcionamiento algoritmo Trilateración

El algoritmo de trilateración utiliza la señal RSSI que envían los *beacons* para determinar la distancia que tienen cada uno de ellos con respecto al objeto a localizar, a partir de esta distancia se trazan los círculos de radio igual a la distancia determinada y empleando el algoritmo de trilateración se obtiene la ubicación del dispositivo móvil, la cual es el punto de intersección de los tres círculos.

Considerando que el objeto móvil a ubicar se encuentra dentro del alcance de la señal de los *beacons* y una vez que ejecutemos la aplicación por medio del botón **Inicio** se ejecuta el algoritmo de trilateración, e indicará al usuario su ubicación en el interior del edificio figura 5.4.



Figura 5.4 Ejecución Aplicación

A continuación, en la tabla 5.2 se muestra los resultados del escaneo de realizado en la búsqueda de un dispositivo, se reciben señales de los beacons instalados en diferentes zonas previamente registradas. Se colocaron Beacons en el área de las Escaleras, Baños, entrada principal, Salón 3102, Laboratorio y Pasillo de la planta baja del departamento de computación, de las cuales las señales más cercanas fueron tomadas por el algoritmo de trilateración, mostrando la ubicación del dispositivo móvil en el área de las Escaleras PB del departamento de computo.

Tabla 5.2 Localización de dispositivos por Trilateración Prueba 1

Objeto 1	Objeto 2	Objeto 3
Posición Beacons	Posición Beacons	Posición Beacons
Escaleras PB	Baños PB	Entrada
Dispositivo	Dispositivo	Dispositivo
0c:cb:85:ed:4d:9d	0c:cb:85:ed:4d:9d	0c:cb:85:ed:4d:9d
Distancia	Distancia	Distancia
0.3	1.2	2.4
RSSI	RSSI	RSSI
39	64	73

A partir de esta información, como se mencionó anteriormente se obtiene la posición concreta del dispositivo a localizar, véase en la figura 5.5.



Figura 5.5 Resultado de búsqueda por trilateración

Realizamos una siguiente prueba en la planta baja del departamento de sistemas, donde las señales más cercanas y tomadas por el algoritmo de trilateración, fue de los beacons posicionados en el área de Baños, Aula 3102 y Laboratorio ubicando el dispositivo en el área del Aula 3102. Como se muestra en la tabla 5.3.

Tabla 5.3 Localización de dispositivos por Trilateración Prueba 2

Objeto 1	Objeto 2	Objeto 3
Posición Beacons	Posición Beacons	Posición Beacons
Baños PB	Aula 3102	Laboratorio
Dispositivo	Dispositivo	Dispositivo
0c:cb:85:ed:4d:9d	0c:cb:85:ed:4d:9d	0c:cb:85:ed:4d:9d
Distancia	Distancia	Distancia
2.7	0.5	1.5
RSSI	RSSI	RSSI
78	42.3	73

Una vez detectadas las señales correspondientes del dispositivo por los *beacons*, es posible proceder al cálculo de la posición con el algoritmo de trilateración, y ubicar el dispositivo en espacios cerrados, figura 5.6.



Figura 5.6 Resultado de búsqueda por Trilateración

Posteriormente, se realizaron 9 ubicaciones en la planta baja del departamento de sistemas. A continuación, se muestran en la tabla 5.4 las ubicaciones y resultados obtenidos de las ubicaciones.

Tabla 5.4 Resultados de las 9 ubicaciones Depto. Computación Planta baja

Distancia (m)	(RSSI)	Ubicación
0.3	45.2	Entrada
0.5	42.3	Escaleras PB
0.3	40.1	Laboratorio
0.8	56.4	Aula 3101
1.8	81.2	Baños PB
0.6	49.1	Aula 3102
2.4	76.2	Baños PB
0.4	52.1	Pasillo PB
0.7	62.3	Aula 3104

Como resultado de las pruebas realizadas, se logró ubicar 7 dispositivos de manera exitosa. Los dos restantes, mostraron un poco de desfase, derivado de la ubicación del dispositivo *beacons* existía

demasiada interferencia por las paredes y muros, se realizó una calibración para mejorar la señal RSSI, pero continuaba mostrando interferencia.

Posteriormente se realizaron 5 pruebas de ubicación en la planta alta del mismo departamento. Los resultados de estas pruebas se muestran en las tablas 5.5 y 5.6. Las zonas registradas fueron Sala de juntas, Baños, Escaleras, Pasillo, Oficina DR.

Tabla 5.5 Localización de dispositivos por Trilateración Prueba

Distancia (m)	(RSSI)	Ubicación
0.4	48.3	Sala de juntas
0.7	66.8	Baños PA
0.9	72.6	Escaleras PA
0.5	56.4	Pasillo PA
0.3	40.1	Oficina DR.

Tabla 5.6 Resultados de las 9 ubicaciones Depto. Sistemas Planta alta

Objeto 1	Objeto 2	Objeto 3
Posición Beacons	Posición Beacons	Posición Beacons
Baños PA	Sala de juntas	Escaleras PA
Dispositivo	Dispositivo	Dispositivo
0c:cb:85:ed:4d:9d	0c:cb:85:ed:4d:9d	0c:cb:85:ed:4d:9d
Distancia	Distancia	Distancia
2.3	0.4	0.9
RSSI	RSSI	RSSI
83.2	48.3	79.2

Como resultado de las pruebas realizadas en la planta alta del departamento de sistemas, se logró ubicar a los dispositivos de manera exitosa. A diferencia de las pruebas realizadas en la planta baja del mismo departamento, la ubicación de los beacons, no presentaron ninguna obstrucción y la señal no se vio afectada. La figura 5.7, presenta el resultado de la prueba realizada, en la planta alta del edificio de sistemas, demostrando la efectividad de la aplicación Ubico. Las figuras 5.8 y 5.9

muestran la ubicación de los beacons en la planta alta del departamento de computación, zona pasillo, Sala de juntas, Baños, Escaleras y oficina DR.

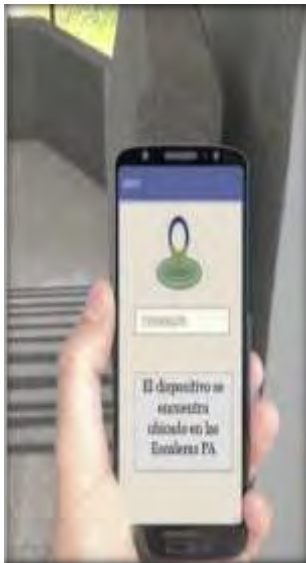


Figura 5.7 resultado de búsqueda planta alta depto. Sistemas

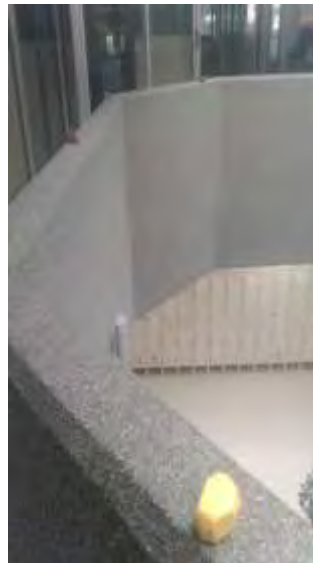


Figura 5.8 Ubicación de beacons planta alta Depto. Computación



Figura 5.9 Ubicación de beacons planta alta Depto. Computación

En las figuras 5.10, 5.11 y 5.12 se muestra la pantalla de búsqueda de dispositivo, donde colocamos el número de los dispositivos a ubicar y pulsamos el botón **Iniciar Búsqueda** para que la aplicación realice la búsqueda.



Figura 5.10 Búsqueda de dispositivo 1



Figura 5.11 Búsqueda de dispositivo 2



Figura 5.12 Búsqueda de dispositivo 3

Los resultados de las búsquedas anteriores se muestran en las figuras 5.13 Ubicación de dispositivo en la Sala de juntas, 5.14 Ubicación de dispositivo en el área de escaleras y 5.15 Ubicación de dispositivo en el área de los baños.

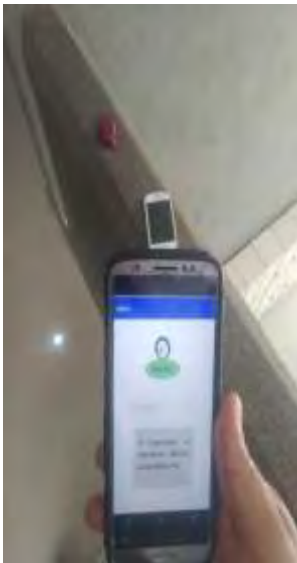


Figura 5.13 Ubicación de dispositivo Sala de juntas planta alta

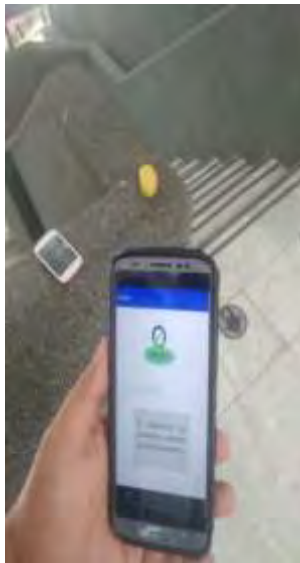


Figura 5.14 Ubicación de dispositivo Escaleras planta alta

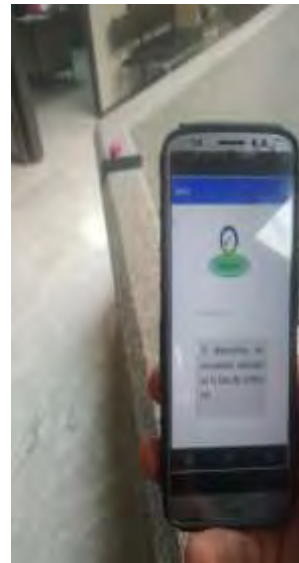


Figura 5.15 Ubicación de dispositivo Baños planta alta

A continuación, se muestran algunas ubicaciones realizadas en el interior del departamento de computo, la figura 5.16 muestra la ubicación del dispositivo móvil en el pasillo, la figura 5.17 muestra la ubicación del dispositivo móvil en las escaleras y la figura 5.18 muestra la ubicación del dispositivo móvil en el área de pasillo, todas estas ubicaciones se realizaron en la planta alta del mismo departamento.

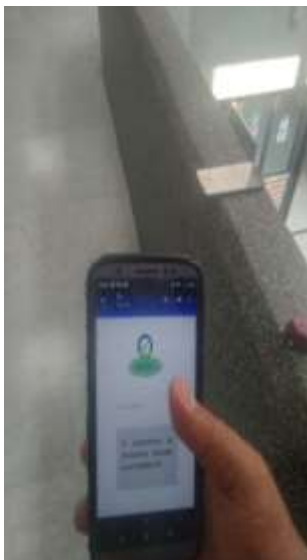


Figura 5.16 Ubicación de dispositivo Pasillo planta alta

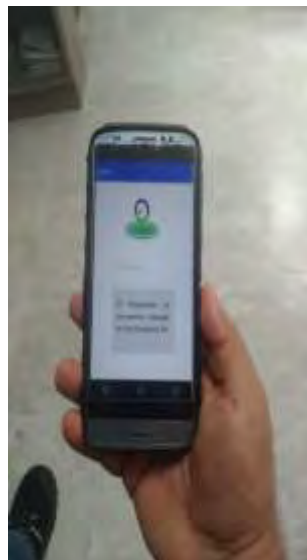


Figura 5.17 Ubicación de dispositivo Escaleras planta alta

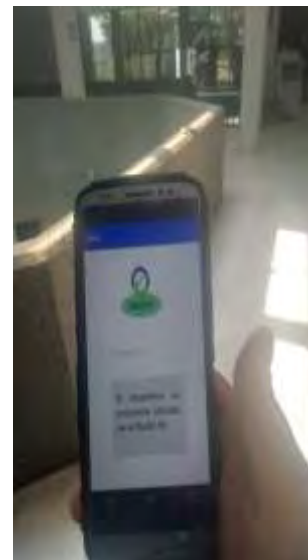


Figura 5.18 Ubicación de dispositivo Pasillo planta alta

Durante las pruebas realizadas, nos encontramos con lugares donde la señal no llegaba a los dispositivos a ubicar derivado de obstrucción por obstáculos en el paso de la señal RSSI, lo solucionamos enviando un mensaje emergente con la última ubicación registrada del dispositivo, como se muestra en las figuras 5.19 y 5.20.

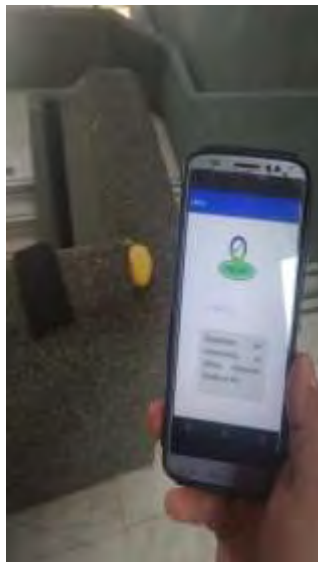


Figura 5.19 Ubicación de dispositivo no encontrado 1



Figura 5.20 Ubicación de dispositivo encontrado 2

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajos futuros

En esta sección se presentan las conclusiones y trabajos futuros que se derivan de la tesis.

6. CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones

En la presente tesis se concluye que utilizar la tecnología *beacons* basado en el algoritmo de trilateración resulta ser una opción confiable si se piensa hacer ubicaciones de dispositivos en espacios cerrados.

Al utilizar la tecnología *beacons* se tiene la ventaja de un menor consumo de energía y una mayor precisión con respecto a los sistemas de posicionamiento GPS para ubicaciones en espacios cerrados. Los resultados de la precisión de la ubicación obtenidos en un área libre de obstáculos en espacios cerrados son aceptables y muy prometedores.

Sin embargo, si la señal RSSI es obstaculizada se degrada y debilita. Por este motivo, en la presente tesis se implementó una señal de RSSI promediada con el algoritmo de trilateración con el objetivo de realizar una localización más precisa.

Tras el despliegue de los *beacons* dentro del departamento de sistemas, se ha demostrado la viabilidad de manejo de estos pequeños dispositivos sin la necesidad de infraestructuras adicionales. Con la implementación de módulos BLE, el apoyo del algoritmo de trilateración y la señal RSSI promediada, se ha conseguido determinar la posición del dispositivo móvil, aunque no de una forma totalmente precisa en los lugares con obstáculos.

Una limitante que se encontró durante las pruebas realizadas al sistema de ubicación en lugares cerrados fue al momento de intentar localizar un dispositivo en espacios cerrados y este contaba con el bluetooth desactivado o se encontraba en un lugar donde la señal RSSI no le llegaba, la aplicación no pudo mostrar una ubicación real del dispositivo buscado en su lugar mostro su última ubicación registrada.

El Sistema Ubico administradores y Ubico Usuarios fueron sometidas a una serie de pruebas y tratamiento de datos, logrando resultados muy alentadores al momento de realizar ubicaciones de los dispositivos en espacios cerrados.

Con el desarrollo de esta aplicación de ubicación de dispositivos en espacios cerrados, se impulsa la transformación digital, haciendo que aquellos edificios tradicionales se vuelvan edificios inteligentes.

6.2 Trabajos futuros

Los trabajos futuros que se proponen para ampliar y/o mejorar este proyecto de investigación se listan a continuación:

- Implementar la opción de enviar notificaciones a los usuarios administradores cuando un usuario ha ingresado o salido del edificio.
- Implementar un módulo, donde se pueda utilizar la tecnología *beacons* en espacios cerrados, con la tecnología GPS en espacios abiertos y así ampliar el campo de ubicación.

- Desarrollar una aplicación multiplataforma en cuanto a marca y software de dispositivos los móviles.
- Realizar una versión web de la aplicación Ubico administrador, con el fin de poder tener acceso y control remoto.
- Implementar una cartografía del edificio para que los resultados de ubicación puedan ser mostrados gráficamente.
- Implementar un módulo que permita trabajar en conjunto con la tecnología Wifi, y poder ampliar y mejorar las señales RSSI, con el objetivo de obtener una mejor ubicación en espacios cerrados.
- Implementar junto con el algoritmo de trilateración, un algoritmo que mejore la precisión de la ubicación, como por ejemplo el vecino más cercano KNN.
- Se propone que el funcionamiento legal de esta aplicación, se base en la Ley federal de protección de datos personales en posesión de los particulares, artículo 16 “Aviso de privacidad”. Donde a) se solicite el consentimiento del usuario para el uso de la aplicación, y permita ser ubicado en todo momento dentro del departamento de sistemas del CENIDET, b) se indique quién es el responsable de recabar la información y su ubicación, c) de igual manera se le informe qué datos serán recabados y con qué fin, y d) que el usuario final puede cancelar, rectificar u oponerse al acuerdo con lo dispuesto en esta ley.
- Implementar módulos de seguridad VPM para proteger la red *bluetooth*, en conjunto con la implementación de medidas para mantener el *firewall* actualizado.

Referencias

- Alcívar, K. I. V., & Cornelio, O. M. (2022). Estado del arte de un sistema IoT, para la interacción con los visitantes de museos. *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, 15(3), 124-138.
- Aparicio, J., Álvarez, F. J., Hernández, Á., & Holm, S. (2022). A Survey on Acoustic Positioning Systems for Location-Based Services. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, 1-36, Art no. 8505336. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3210943>.
- Bibbó, L., Carotenuto, R., & Della Corte, F. (2022). An Overview of Indoor Localization System for Human Activity Recognition (HAR) in Healthcare. *Sensors*, no. 21: 8119, doi.org/10.3390/s22218119.
- Bilbao-Jayo, A., Almeida, A., Sergi, I., Montanaro, T., Fasano, L., Emaldi, M., & Patrono, L. (2021). Behavior Modeling for a Beacons-Based Indoor Location System. *Sensors*, no. 14: 4839. <https://doi.org/10.3390/s21144839>.
- Cocom, D. E. (2019). *Sistemas de posicionamiento en interiores tecnologías, aplicaciones y evolución*. Trabajo de grado, Universidad de Quintana Roo, <http://hdl.handle.net/20.500.12249/2706>.
- Wahab, N. H. A., Sunar, N., Ariffin, S. H., Wong, K. Y., & Aun, Y. (2022). Indoor Positioning System: A Review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 13, no. 6, 477-490.
- De Oliveira Santos, G. N., Cruz, H. T., Puc, F. I. C., Borges, J. A. L., Pacheco, J. C. R., & Segura, J. R. G. (2021). Una revisión sobre los sistemas de localización de robots en entornos interiores: técnicas, tecnologías y algoritmos. *Pistas Educativas*, vol. 43, no. 140, 203-226.
- Flórez Gómez, J. (2019). *Estudio y diseño de la implantación de sistema de localización indoor en entorno industrial*. Trabajo de grado, Maestría, Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, España, Recuperado el 16 de febrero de 2023, de https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/51641/TFM_JoseFloresGomez.pdf?sequence=4.
- Furquez, N., & Saldías, O (2021). *Localización robótica interior*. Tesis de grado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería Universidad de la República Uruguay, <https://hdl.handle.net/20.500.12008/28344>.
- García-Bautista, J. A., & Cuaya-Simbro, G. (2022). Trilateration and filtering of Wi-Fi RSSI signals as sensors for an indoor positioning system. *Revista Internacional Socio-Innova-Tec del Altiplano*.
- Hayward, S. J., van Lopik, K., Hinde, C., & West, A. A. (2022). A survey of indoor location technologies, techniques and applications in industry. *Internet of Things*, vol. 20, 100608. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100608>.
- Hou, Y., Yang, X., & Abbasi, Q. H. (2018). Efficient AoA-based wireless indoor localization for hospital outpatients using mobile devices. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18 no. 11, 3698. <https://doi.org/10.3390/s18113698>.

- Jang, B., Kim, H., & Kim, J. W. (2023). Survey of landmark-based indoor positioning technologies. *An International Journal on Information Fusion*, 89, 166–188. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2022.08.013>.
- Kotrotsios, K., Fanariotis, A., Leligou, H. C., & Orphanoudakis, T. (2022). Design Space Exploration of a Multi-Model AI-Based Indoor Localization System. *Sensors* (Basel, Switzerland), 22(2), 570. <https://doi.org/10.3390/s22020570>.
- K. Konstantinos and T. Orphanoudakis. (2019). Bluetooth Beacons Based Accurate Indoor Positioning Using Machine Learning. *4th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)*. 1-6.
- K. Kotrotsios and T. Orphanoudakis. (2021). Accurate Gridless Indoor Localization Based on Multiple Bluetooth Beacons and Machine Learning. *7th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, Piraeus, Greece, 2019, 1-6, doi: 10.1109/SEEDA-CECNSM.2019.8908304.
- Maduranga, M. W. P., Ganepola, D., & Kathriarachchi, R. P. S. (2021). Comparison of Trilateration and Supervised Learning Techniques for BLE Based Indoor Localization. *International Research Conference*, 60-64, <http://ir.kdu.ac.lk/handle/345/5189>.
- Moya Velasco, W. P. (2019). *Implementación de un algoritmo de localización en interiores para resolver el problema de ubicación de objetos usando tecnología Bluetooth Low Energy*. Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Republica de Ecuador. Edu.ec. Recuperado el 17 de febrero de 2023, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20577/1/CD%2010074.pdf>.
- Pascale, F., Adinolfi, E. A., Avagliano, M., Giannella, V., & Salas, A. (2021). A low energy IoT application using beacons for indoor localization. *Applied Sciences*, 11(11), 4902. doi.org/10.3390/app11114902.
- Shiraki, S., & Shioda, S. (2022). Contact Information-Based Indoor Pedestrian Localization Using Bluetooth Low Energy Beacons. *IEEE access: practical innovations, open solutions*. 10, 119863-119874. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3222301.
- Singh, N., Choe, S., & Punmiya, R. (2021). Machine learning based indoor localization using Wi-Fi RSSI fingerprints: an overview. *IEEE Access*. 9, 127150-127174. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3111083.
- Szyc, K., Nikodem, M., & Zdunek, M. (2023). Bluetooth low energy indoor localization for large industrial areas and limited infrastructure. *Ad Hoc Networks*, 139, 103024. doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.103024.
- Xhafa, F. (2019). Innovative systems for intelligent health informatics: Data science, health informatics, intelligent systems, smart computing. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Vol. 72. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70713-2_78.
- Zafari, F., Gkelias, A., & Leung, K. K. (2019). A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2568-2599. <https://doi.org/10.1109/comst.2019.2911558>.

Zhang, X., He, F., Chen, Q., Jiang, X., Bao, J., Ren, T., & Du, X. (2022). A differentially private indoor localization scheme with fusion of WiFi and bluetooth fingerprints in edge computing. *Neural Computing and Applications*, 1-22, 4111–4132. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06815-9>.